

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
Направление подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника  
Отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ВЫБОР РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТОПРОВОДОМ С БОЛЬШИМ ТРАНСПОРТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ</b>

УДК 004.421:681.515

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ81	Хасанов Михаил Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Курганов В.В.	к.т.н., доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Конотопский В. Ю.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Горбенко М.В.	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Малышенко А.М.	д.т.н., профессор		

## Результаты обучения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1),

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
		согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEAN
P10	Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 16.04.01 «Техническая физика»  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### **ЗАДАНИЕ** **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Хасанову Михаилу Александровичу

Тема работы:

<b>Разработка алгоритмов и выбор регуляторов для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	28.02.2020 г, 59-55с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования являются параметры регуляторов объекта с транспортным запаздыванием  1) Лабораторный стенд с объектом управления; 2) Программное обеспечение; 3) ПИД-регулятор; 4) Предиктор Смита
--	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Выбор регуляторов;</li> <li>2) Обоснование выбора контроллера;</li> <li>3) Создание управляющей программы в среде Codesys;</li> <li>4) Идентификация объекта управления;</li> <li>5) Исследование предиктора Смита и ПИД регулятора;</li> <li>6) Моделирование в среде Matlab Simulink и проверка результатов моделирования;</li> <li>7) Исследование параметров реального объекта с регуляторами;</li> <li>8) Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</li> <li>9) Раздел «Социальная ответственность».</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация PowerPoint</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН, к.т.н., Конотопский В. Ю.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент ООД, к.т.н., Горбенко М.В.</p>
<p>Приложение Б</p>	<p>Старший преподаватель ОИЯ, Горбатова Т. Н.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Введение, обзор литературы, экспериментальные методы исследования</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>21.02.2020</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОАР</p>	<p>Курганов В.В.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8ЕМ81</p>	<p>Хасанов Михаил Александрович</p>		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ81	Хасанову Михаилу Александровичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.06 Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ, ставка дисконтирования $i=0.1$ )

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования
2. Разработка устава научно-технического проекта	Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ 2. Сегментирование рынка 3. Оценка конкурентоспособности технических решений 4. Диаграмма FAST 5. Матрица SWOT 6. График проведения и бюджет НТИ - <u>выполнить</u> 7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ - <u>выполнить</u> 8. Потенциальные риски
---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	к.т.н, доцент		26.02.2020 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ81	Хасанов Михаил Александрович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
8ЕМ81		Хасанову Михаилу Александровичу	
Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 Мехатроника и робототехника

Тема ВКР:

**Разработка алгоритмов и выбор регуляторов для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (алгоритм, регулятор, контроллер, рабочая зона) и области его применения	Исследование параметров регулятора объекта с транспортным запаздыванием
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– вредные вещества; – шумы; – электромагнитные поля; – высокое напряжение; – искусственное освещение. – Использование средств индивидуальной и коллективной защиты; – соблюдение электро и пожаровзрывобезопасности.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– попадание вредных элементов в гидросферу.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– поражение электрическим током; – пожар; – взрыв.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Горбенко М.В.	К.Т.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ81	Хасанов Михаил Александрович		



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 128 с., 30 рис., 26 табл., 57 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: стенд, ПИД регулятор, предиктор Смита, запаздывание, управление.

Объектом исследования являются параметры системы с регулятором объекта с транспортным запаздыванием.

Цель работы – анализ существующих алгоритмов управления стендом физического подобия технологического процесса с запаздыванием; исследование и сравнительный анализ предиктора Смита и ПИД – регулятора.

Проведён анализ существующих алгоритмов управления объектами. Для управления объектом было предложено использование классического ПИД-регулятора и специального регулятора для объектов с запаздыванием - предиктора Смита.

Для настройки коэффициентов регулятора произведена идентификация объекта управления по кривой разгона. На реальном объекте было проведено моделирование замкнутых систем с ПИД-регулятором и предиктором Смита. В результате моделирования предиктор Смита показал лучшие качественные показатели.

Области применения – технологические процессы с транспортным запаздыванием.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Литературный обзор .....	16
1.1 Технологические процессы с транспортным запаздыванием .....	16
1.2 Идентификация объекта управления .....	19
1.2.1 Графический метод идентификации с помощью переходной характеристики .....	21
1.3 Пропорционально-интегро-дифференцирующие регуляторы .....	24
1.4 Методики настройки ПИД-регулятора .....	28
1.5 Метод Циглера-Никольса.....	29
1.6 Влияние запаздывания на устойчивость замкнутой системы .....	31
1.7 Регулятор Смита для систем с запаздыванием .....	39
2 Объект и методы исследования.....	43
2.1 Описание стенда физического подобия технологического процесса и средств исследования.....	43
3 Экспериментальная часть работы .....	48
3.1 Идентификация объекта управления .....	48
3.2 Исследование и моделирование систем с регулятором Смита и ПИД- регулятором в среде Matlab Simulink.....	50
3.3 Исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием .....	53
3.4 Результаты исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием .....	57
3.5 Выводы .....	62
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	64
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	65

4.1	.1 Потенциальные потребители.....	65
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	65
4.2	SWOT-анализ .....	66
4.3	Структура работ в рамках научного исследования.....	68
4.4	Определение трудоемкости выполнения работ .....	69
4.5	Разработка графика проведения научного исследования .....	70
4.6	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	72
4.7	Расчет материальных затрат НТИ.....	73
4.8	Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ .....	73
4.9	Расчет амортизационных расходов .....	74
4.10	Заработная плата исполнителей темы .....	75
4.11	Отчисления во внебюджетные фонды .....	76
4.12	Накладные расходы.....	76
4.13	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта....	77
4.14	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	77
4.15	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент».....	79
5	Социальная ответственность .....	81
5.1	Аннотация выпускной квалификационной работы по разделу социальная ответственность .....	81
5.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	81
5.3	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	83
5.4	Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	86
5.5	Электромагнитное излучение.....	88
5.6	Электробезопасность.....	89
5.7	Превышение уровня шума.....	90
5.8	Искусственное освещение .....	91
5.9	Нервно-психические перегрузки .....	96
5.10	Перенапряжение зрительных анализаторов .....	97

5.11	Экологическая безопасность .....	97
5.12	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	98
5.13	Техногенная безопасность .....	98
5.14	Безопасность при природных чрезвычайных ситуациях .....	101
5.15	Анализ объекта исследования .....	102
5.16	Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	103
5.17	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	104
5.18	Выводы по разделу «Социальная ответственность» .....	105
	Заключение .....	106
	Список литературы .....	107
	Приложение А .....	112
	Приложение Б .....	113

## Введение

На сегодняшний день очень трудно представить многообразие видов промышленных роботизированных производств без средств автоматизации технологических процессов, поскольку это значительно упрощает и повышает эффективность управления различными множеством роботизированных технологических процессов, а также мехатронных роботизированных конвейерных линий, что в конечном итоге положительно отражается на экономических показателях производства. Из этого можно сделать вывод, что создание средств автоматизированных систем является очень актуальной, важной и сложной задачей.

Актуальность исследуемой темы обусловлена широким распространением технологических комплексов с транспортным запаздыванием. Системы автоматизации характеризуются операциями автоматического управления: измерения, обработки, синхронизации движущегося объекта с перенесением обработанной информации на пульт управления. Объем и сложность современных технологических комплексов, их систем и подсистем автоматизации в совокупности с системами программного обеспечения постоянно растут. Успешное функционирование автоматизированных систем зависит от грамотной постановки задачи с указанием функций системы, которые должны быть автоматизированы, определением интерфейсов человек-компьютер, описанием способов взаимодействия системы с ее окружением и т.д.

Запаздывание, являющееся результатом движения какого-либо продукта по длинным продуктопроводам или конвейерным линиям, называется транспортным запаздыванием, например, движение вещества в производственном процессе с определенной скоростью, без каких-либо изменений его свойств, помимо этого, запаздывание может быть и в производственных системах регулирования где приборы действуют не постоянно или с какими-либо перебоями в работе. Расчет подобных систем способен иметь множество особенностей и специфик. Появление звена запаздывания в технологической системе дает дополнительные сложности в

управлении и регулировании технологическим процессом, уменьшается запас устойчивости, ухудшаются показатели качества переходных процессов. В подавляющем большинстве случаев запаздывание негативно влияет на общую динамику системы, в результате чего возникают трудности с устойчивостью и качеством управления.

Однако можно привести примеры и положительного влияния запаздывания на технологический процесс. Если влияние запаздывания на динамику процесса незначительное, то им очень часто пренебрегают и такие технологические процессы называют системами со скрытым запаздыванием.

В ряде случаев пренебречь транспортным запаздыванием в объекте управления нельзя. Поэтому организации, имеющие на своих производствах запаздывающие технологические процессы вынуждены искать пути выхода из ситуации. Они находят такие способы регулирования и управления, которые учитывают особенности систем с транспортным запаздыванием.

Практикой установлено, что большинство ошибок происходит на начальном этапе проектирования технических систем (ТС), при разработке имитационной модели.

Вопросам разработки и внедрения автоматизированных технологических процессов с запаздыванием уделяется внимание в литературных источниках [1-2]. Следует отметить, что существуют работы в которых рассматривают методы исследования подобных систем, например, в источнике [3], а детальное и настоящее положение дел в этих системах в источнике [4].

Целью настоящей магистерской диссертации является:

- анализ существующих алгоритмов и решений управления, и регулирования реальными объектами с транспортным запаздыванием;
- исследование и сравнительный анализ предиктора Смита (Регулятора Смита) и ПИД – регулятора, при управлении стендом физического подобия технологического процесса транспортировки жидкостного материала по трубе.

Исследование проводится на лабораторном стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием, в котором в

качестве звена транспортного запаздывания выступает незаполненный трубопровод для перемещения жидкостного материала.

Для реализации поставленной цели, необходимо выполнить следующие задачи:

- сформировать видение об работе различных систем с запаздыванием, способах их управления и регулирования;
- идентифицировать стенд физического подобия, как объект управления с апериодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием;
- смоделировать работу системы с запаздыванием, включающие в себя регулятор Смита и ПИД регулятор:
- выполнить настройку коэффициентов регулятора и провести натурные эксперименты на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием;
- разработать программу управления, реализующую предиктор Смита и ПИД регулятор;
- сравнить результаты и сделать выводы об возможности применения регуляторов в технологических процессах с транспортным запаздыванием.

## 1 Литературный обзор

### 1.1 Технологические процессы с транспортным запаздыванием

Значительную долю в промышленности занимают объекты с транспортным запаздыванием. Таких примеров можно привести множество. В основном это производства, где составные части технологического процесса, находятся на расстоянии друг от друга достаточным для того чтобы, в технологическом процессе появилось звено запаздывания.

Примером технологического процесса с транспортным запаздыванием является процесс транспортировки сыпучих материалов.

В данном случае процесс начинается с погружения материала в бункер, откуда он попадает через устройство дозатора на ленточный транспортер, в ходе перемещения материала по ленточному транспортеру материал попадает в следующий необходимый узел технологического процесса рисунок 1.1 [5].

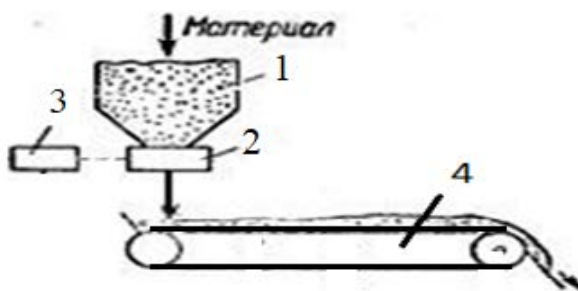


Рисунок 1.1 – Процесс перемещения сыпучих материалов: 1 – устройство погружения (бункер); 2 – дозирующее устройство; 3 - вариатор; 4 - ленточный транспортер

Еще одним примером технологического процесса с запаздыванием может быть стан холодной прокатки. На рисунке 1.2а показана схема однонаправленного непрерывного стана холодной прокатки.



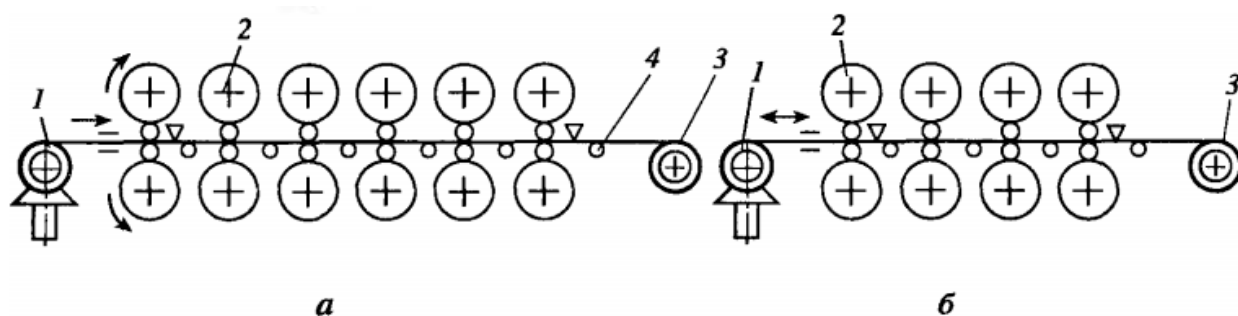


Рисунок 1.2 – Схема процесса стана холодной прокатки:

1 - разматыватель; 2 – клеть (валик); 3 - моталка; 4 – измеритель натяжения

С устройства разматывателя 1 идет сталь через ряд клеток 2 и попадает на моталку 3.

В случае реверсивного стана, рисунок 1.2 (б), где направление прокатки меняет вращения разматывателя 1, валков 2 и моталки 3 [6, 7].

Еще одним примером может быть производство цементного клинкера. На рисунке 1.3 изображена схема технологического процесса вращающейся печи при производстве цементного клинкера.

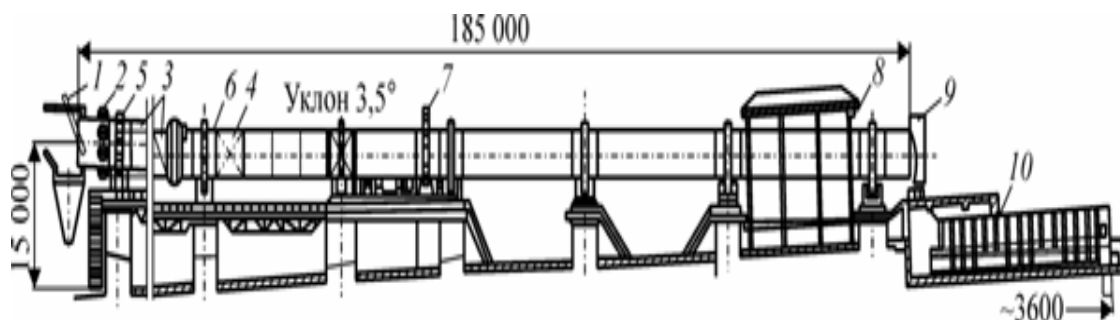


Рисунок 1.3 – Схема технологического процесса вращающейся печи  
мокрого способа производства цементного клинкера:

1 – шламовая течка; 2 – подогревающий фильтр; 3 – завеса; 4 – теплообменник;  
5 – бандаж; 6 – обечайка; 7 – венцовый привод; 8 – охладитель; 9 – головка  
печи; 10 – клинкерный холодильник

Цементный клинкер – это необходимый составной компонент производства цемента, который производится в вращающихся печах. Вращающаяся печь – это пустой внутри барабан, из выложенных внутри

кирпичей. Корпус печи располагается под углом  $\sim 4^\circ$  относительно горизонта и вращается вокруг оси. В загрузочную часть подается сырье, а в разгрузочной части устанавливается устройство, которое сжигает топливо. В основном для сжигания используют газ, уголь или мазут. Затем, сырье попадает к головке печи и поступает в холодильник [8].

Отличным примером технологического процесса с транспортным запаздыванием является характерный для нефтедобывающих стран – транспортировка нефти. Магистральный трубопроводный транспорт предназначен для транспортировки продукции (нефтепродуктов, газа, широких фракций лёгких углеводородов), от точки приёма нефти до точки её передачи. Магистральный трубопровод – это комплекс состоящий из труб, которые могут быть подземными и надземными, а также могут проходить под водой (под реками и озерами).



Рисунок 1.4 - Схема технологического процесса транспортировки нефти

Работа нефтеперекачивающих станций является причиной появления давления, которое необходимо в трубах для того чтобы осуществлять транспортировку нефти с определенной технологической скоростью. Назначение всех станций на пути следования траектории магистрального трубопровода, взять нефть из области низкого давления, что расположено перед станцией и принудительно дренировать в область высокого давления, после станции. Данную функцию выполняют устройства насосные подпорные станции. На рисунке 1.4 показана головная нефтеперекачивающая станция, находящаяся в начале нефтепровода, и промежуточные нефтеперекачивающие станции, расставленные по технологическому тракту нефтепровода через определенные промежутки расстояния. В общем случае можно сказать, что создаваемого нефтеперекачивающей станцией давления должно хватить для транспортировки нефти с заданным расходом до следующей нефтеперекачивающей станции. Промежуточные нефтеперекачивающие станции увеличивают давление транспортируемой нефти в нефтепроводе, которая поступает с прошлых линейных участков, делая нефтепродукты достаточно способными для продвижения нефти до следующего участка и так до конечного пункта нефтепровода, это может быть резервуарный парк, перевалочная точка, или морской порт, где нефть транспортируется дальше или используется в каком-либо технологическом процессе.

## 1.2 Идентификация объекта управления

При разработке автоматизированных систем управления важно правильно выделить объект управления из общей производственно-технологической структуры предприятия. В данной магистрантской работе объектом управления выступает стенд физического подобия с апериодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием.

Идентификация объекта управления осуществляется на основе наблюдения, с применением аналитических и экспериментальных методов. При

этом имеется возможность использовать математическую модель как на этапе разработке объекта, так и на этапе его эксплуатации.

Построение математической модели производится различными методами, в том числе: аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим [9-12, 20, 21].

Аналитический метод предполагает, что сбор информации об объекте осуществляется на основе законов физики, механики и прочих наук. Метод дает хорошие результаты, если объект управления прост и хорошо изучен. Если объект управления сложен и невозможно в полном объеме собрать информацию, то применяют экспериментальный метод. Он основывается на сборе и обработке статистики об особенностях технологического процесса. При экспериментально-аналитическом методе априорная модель, полученная аналитическим путем уточняется в процессе экспериментов [22].

При получении полной информации об объекте, соответственно возможно получить достаточные и достоверные результаты. При отсутствии достаточных данных об объекте описание математическими моделями выглядит сложным и, зачастую, невозможным. В таком случае прибегают к экспериментальным методам.

Основная задача идентификации заключается в определении передаточной функции объекта, преобразующей входные сигналы в выходные. Выделяют структурную и параметрическую идентификацию. Через структурную идентификацию определяет вид математической модели (передаточной функции). Через параметрическую идентификацию определяются числовые параметры математической модели.

В качестве примера рассмотрим рисунок 1.5. На нём представлено взаимодействие объекта с окружающей средой. На рисунке стрелками  $u$  и  $f$  изображены различные воздействия внешних факторов на объект. Выходная величина в данном случае была обозначена « $y$ » (указана стрелкой в направлении от объекта).



Рисунок 1.5 – Схема взаимодействия объекта с внешними воздействиями

При создании модели необходимо [22]:

- 1) определить условия сбора информации об объекте;
- 2) определить класс модели, которая наиболее подходит для конкретного случая;
- 3) рассчитанная математическая модель не всегда может быть схожа с исследуемой реальной системой, таким образом, более правильным будет обращать внимание на схожесть выходных параметров модели и объекта, а также необходимо минимизировать ошибку;
- 4) определить параметры: коэффициенты разностных, интегральных, дифференциальных уравнений, или вовсе конструкций линейной модели объекта, так как данные параметры входят в математическую модель;
- 5) завершающий этап, прежде чем использовать модель, важным моментом является ее оценка на адекватность к реальному объекту.

### 1.2.1 Графический метод идентификации с помощью переходной характеристики

В подавляющем большинстве случаев для определения передаточной функции системы необходимо использовать переходную характеристику, полученную аналитическим или экспериментальным методом. Данный метод графической идентификации с помощью переходной характеристики подходит для большинства типов систем. Например, есть график переходного процесса. В момент  $t_0=0$  величина  $x$  изменяется на величину  $a$ .

Тогда, запишем уравнение объекта, искомое уравнение для объекта примет вид:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t) \quad (1.1)$$

или

$$W(p) = \frac{k}{T_p + 1} \quad (1.2)$$

Необходимо определить параметры Т и k.

Рассмотрим несколько методов их определения.

1. При заданный начальных условиях найдем аналитическое решение, где будут Т и k, и получим параметры аналитического выражения решения, для начальных условий  $y=0$  при  $t=0$  и  $x=a$  при  $t>0$ , в общем виде выражение выглядеть будет таким образом:

$$y(t) = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1.3)$$

Далее возьмем на графике две точки, поставим координаты данных точек в выражения решения и получим два уравнения для нахождения Т и k:

$$y_1(t) = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{t_1}{T}}), y_2(t) = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{t_2}{T}});$$

2. Чтобы осуществить более точное вычисление, необходимо поделить график на ординаты  $y_1, y_2, y_3$  с шагом  $\Delta t$ , далее запишем решения для точек:

$$y_0 = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{0}{T}}),$$

$$y_1 = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}),$$

$$y_2 = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{2\Delta t}{T}}),$$

$$y_3 = k \cdot a \cdot (1 - e^{-\frac{3\Delta t}{T}})$$

и т.д. Теперь имеем

$$y_1 - y_0 = k \cdot a - k \cdot a \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T}},$$

$$y_2 - y_1 = k \cdot a \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T}} - k \cdot a \cdot e^{-\frac{2\Delta t}{T}},$$

$$y_3 - y_2 = k \cdot a \cdot e^{-\frac{2\Delta t}{T}} - k \cdot a \cdot e^{-\frac{3\Delta t}{T}}$$

и т.д.

Далее обозначим  $e^{-\frac{\Delta t}{T}} = q$ , тогда

$$y_1 - y_0 = k \cdot a \cdot (1 - q),$$

$$y_2 - y_1 = k \cdot a \cdot q \cdot (1 - q),$$

$$y_3 - y_2 = k \cdot a \cdot q^2 \cdot (1 - q)$$

и т.д.

Из выше сказанного можно утверждать

$$q_1 = \frac{y_2 - y_1}{y_1 - y_0};$$

$$q_2 = \frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1};$$

$$q_3 = \frac{y_4 - y_3}{y_3 - y_2} \text{ и т.д.}$$

Разница в значениях  $q$  определяется ошибками эксперимента и определения значений  $y(t)$ . Найдя  $\bar{q}$  полученных значений  $q_i$ , можем получить уточненное значение постоянной времени из следующего выражения

$$\bar{T} = -\frac{\Delta t}{\ln \bar{q}} \text{ (из } e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \bar{q}, -\frac{\Delta t}{T} = \ln \bar{q})$$

и аналогично

$$k_1 = \frac{y_1 - y_0}{a \cdot (1 - q)}; k_2 = \frac{y_2 - y_1}{a \cdot q_2 \cdot (1 - q_2)}; k_3 = \frac{y_3 - y_1}{a \cdot q_3^2 \cdot (1 - q_3)} \text{ т.д. ;}$$

3. При  $t \rightarrow \infty$ ,  $y(t) = k \cdot a$ , то есть через ординату асимптоты (ордината асимптоты  $b = k \cdot a$ ) можно определить  $k$ . Коэффициент  $k$  представляет собой соотношение между установившейся величиной выходного сигнала системы и амплитуды входного сигнала:

$$y(t) = b \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = b \cdot (1 - e^{-1}) = b \cdot (1 - 0.37) = 0.63 \cdot b. \quad (1.4)$$

Отсюда можно утверждать что, постоянная времени  $T$  системы первого порядка равна отрезку времени, за которое переходная функция достигает 63% своей установившейся величины. Отметив на графике 63% установившейся величины переходного процесса, определяем абсциссу этой точки (параметр  $T$ );

4. Постоянную  $T$  можно также определить другим путем.

Продифференцируем решение и устремим  $t$  к 0, тогда

$$y' = \frac{dy(t)}{dt} = k \cdot a \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}},$$

$$\frac{dy(0)}{dt} = k \cdot a \cdot \frac{1}{T} = \frac{b}{T} = \operatorname{tg} \alpha,$$

здесь  $\operatorname{tg} \alpha$  – угол наклона касательной к графику функции при  $t=0$ . Тогда  $T = \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha}$ . Величина  $T$  это отрезок оси, равный расстоянию от начала координат до точки, в которой касательная пересекается с асимптотой (т.к.  $y'$  – угловой коэффициент касательной). Это самое простое решение, но не самое точное, т.к. очень сложно провести касательную и определить точно ординату асимптоты  $b$ .

Если переходная функция запаздывает на время  $\tau$ , то есть равна 0 в течение промежутка времени  $\tau$  после приложения ступенчатого возмущения, то система имеет чисто временное запаздывание, для которого преобразование Лапласа есть  $e^{-\tau s}$ . Следовательно, если переходная функция системы равна

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau \\ k \cdot (1 - e^{-\frac{(t-\tau)}{T}}), & t > \tau \end{cases} \quad (1.5)$$

то передаточная функция системы получается в виде  $W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{T \cdot s + 1}$  [13-14].

### 1.3 Пропорционально-интегро-дифференцирующие регуляторы

Сегодня существует множество математических алгоритмов управления. Одним из самых распространенных в силу своей универсальности является ПИД (пропорционально-интегро-дифференцирующий) регулятор [24].

В настоящее время ПИД регуляторы становятся все наиболее часто используемыми в автоматизированных системах (в 95% технологических процессах, где существует потребность в регулирующих контурах). Это связано с тем, что данные регуляторы позволяют достигать поставленных целей управления для большинства технологических объектов, они имеют компактную и простую структуру. В последнее время еще и добавились нововведения, которые позволяют бороться с насыщением интегральной составляющей регулятора [25-27].



ПИД-регулятор используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью достижения двух показателей: точности и качества переходного процесса. Данный регулятор представляет собой универсальный механизм с обратной связью, широко используемый в промышленной системе управления. Данный контроллер способен свести к минимуму ошибку, регулируя вход управления [28].

Алгоритм ПИД-регулятора включает в себя три параметра, называемые пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) значениями. Эти значения можно интерпретировать с точки зрения времени [28]. В данном регуляторе пропорциональный коэффициент - обеспечивает общее управляющее воздействие пропорционально сигналу ошибки. Интегральный параметр - уменьшает стационарные ошибки за счет низкочастотной компенсации интегратором. Дифференцирующий параметр - улучшает отклик за счет высокочастотной компенсации дифференциатором [29]. П-значение зависит от текущей ошибки, И-значение - от накопления прошлой ошибки, а Д-значение – это прогноз будущей ошибки, основанный на текущей скорости изменения.

Отдельное влияние этих трех составляющих на производительность замкнутого цикла суммировано в таблице 1.1. Для более лучшей настройки коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$  желательно обратиться к таблице, в которой приведены взаимосвязи в настройке.

Таблица 1.1 – Настройки коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_D$  [29]

Замкнутый ответ	Время нарастания	Перерегулирование	Стабильность
Увеличение $K_p$	Увеличение	Увеличение	Ухудшение
Увеличение $K_i$	Небольшое уменьшение	Увеличение	Ухудшение
Увеличение $K_D$	Небольшое уменьшение	Снижение	Улучшение

В работе системы управления возможны колебания сигнала. Это требует медленных и устойчивых изменений на выходе контроллера. Полный ПИД-регулятор, по сравнению с ПИ-регулятором, позволяет проводить изменения заданных значений в процессе эксплуатации объекта [30-32].

Структурная схема классической системы ПИД-управления показана на рисунке 1.6.

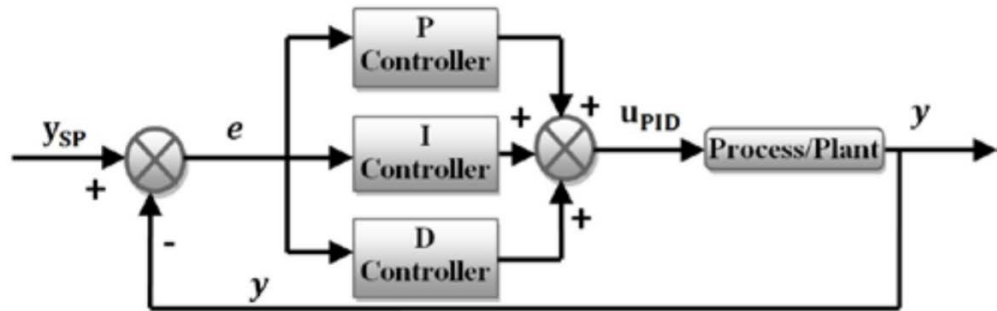


Рисунок 1.6 – Система регулирования с ПИД-регулятором [33]

Выходной сигнал классического ПИД-регулятора, как показано на рисунке, определяется по формуле 1.6 [33]:

$$u_{PID}(t) = K_C e(t) + \frac{K_C}{\tau_I} \int e(t) dt + K_C \tau_D \frac{de}{dt} \quad (1.6)$$

где  $e(t)$  – ошибка,  $K_C$  – коэффициент пропорциональности (константа),  $\tau_I$  – интегральная постоянная времени,  $\tau_D$  – дифференциальная постоянная времени,  $U_{PID}$  – выход классического ПИД-регулятора [34-36].

Закон регулирования представлен ниже:

$$Wp(p) = \frac{K_p + K_p}{T_i + K_d \cdot T_d p} \quad (1.7),$$

где  $K_p$  – пропорциональный коэффициент,  $T_i$  – интегральный коэффициент,  $K_d$  – дифференциальный коэффициент.

Закон регулирования формируется благодаря параллельной (рис. 1.7б) или последовательной (рис. 1.7а) корректировке ПИ-регулятора посредством реального дифференцирующего звена. В обоих случаях ПИД-закон является приближенным.

В коррекции происходящей последовательно:

$$W_{\text{пид}}^*(p) = \left[ \frac{K_d T_d p}{(1 + T_d p)} + 1 \right] \frac{K_p}{T_i p} (1 + T_i p) = \frac{1}{1 + T_d p} \left( K_p^* + \frac{K_p}{T_i p} + K_p T_d^* p \right) \quad (1.8)$$

Где,

$$K_p^* = K_p \left[ 1 + \frac{T_d}{T_i} (1 + K_d) \right]; \quad T_d^* = T_d (1 + K_d)$$

В происходящей параллельно коррекции:

$$\begin{aligned} W_{\text{пид}}^*(p) &= \frac{K_p (1 + T_i p)}{T_i p \left[ 1 + \frac{K_d T_d p}{1 + T_d p} \cdot \frac{K_p}{T_i p} (1 + T_i p) \right]} = \\ &= \frac{1}{1 + T^* p} \left[ K_p^* \left( 1 + \frac{T_d}{T_i} \right) + \frac{K_p^*}{T_i p} + K_p^* T_d p \right], \end{aligned} \quad (1.9)$$

Где

$$K_p^* = \frac{K_p}{\left( 1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i} \right)}; \quad T^* = T_d \frac{1 + K_p K_d}{1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i}} \quad (1.10)$$

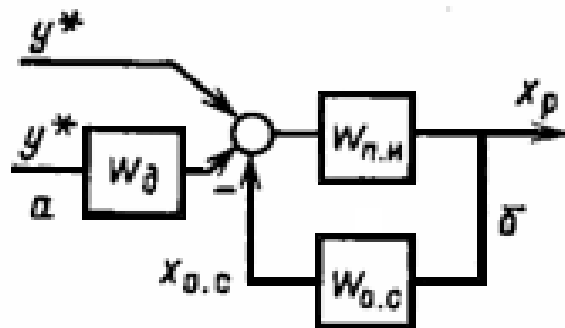


Рисунок 1.7 – Изображение, последовательной - а и параллельной коррекции – б

На рисунке 1.8 представлены переходные характеристики ПИД-регуляторов.

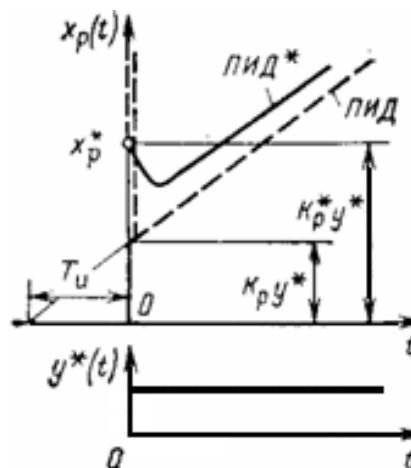


Рисунок 1.8 – Переходные характеристики ПИД-регуляторов

ПИД-регулятор имеет несколько параметров:  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  и  $K_d$ . Данные параметры являются следствием экспериментальных кривых разгона ПИ-регулятора и реального дифференцирующего звена. Параметры настройки ПИД-регулятора  $K_p^*$  и  $T^*$  можно определить формулами (1.10). На рисунке 1.8 приведена кривая разгона ПИД-регулятора [15-17].

Таким образом можно сказать, что первая составляющая ПИД – регулятора, то есть пропорциональная составляющая способна вырабатывать выходной сигнал, который в свою очередь противодействует отклонению регулируемому значению от заданной величины, чем больше заданное значение, тем больше будет отклонение. Вторая составляющая, интегрирующая составляющая пропорциональна интегралу по времени, она избавляется от статистической ошибки (величина сигнала стабилизируется на заданном значении, если нет внешних возмущений). Третья составляющая, дифференцирующая составляющая пропорциональна динамике изменения отклонения регулируемой величины (предназначена для создания противовеса отклонениям от заданных значений).

#### 1.4 Методики настройки ПИД-регулятора

Как было указано ранее, система с ПИД-регулятором должна быть точной, но на практике, большая часть промышленных процессов работает

нелинейно, изменчивость параметров и неопределенность моделей очень высоки, поэтому при использовании обычного ПИД-регулирования точное управление процессом не может быть достигнуто. Проблема может быть хорошо решена путем применения гибких вычислительных методов для настройки ПИД-регулятора. Они особенно полезны для решения сложных в вычислительном отношении задач и математически прослеживаемых в источнике [37].

В таблице 1.2 представлены наиболее часто встречаемые и перспективные методы настройки ПИД-регуляторов.

Таблица 1.2 – Методы настройки ПИД-регулятора [37]

Метод	Преимущества	Недостатки
Ручная настройка	Не требуются математические вычисления	Требуется высококвалифицированный персонал
Циглера-Николса	Метод проверен временем	Могут возникать ошибки Достаточно жесткий метод настройки
Коэна-Куна	Хорошие модели процессов	Используется только для процессов первого порядка

### 1.5 Метод Циглера-Никольса

Метод Циглера-Никольса появился еще в 1942 году, и был официально опубликован как метод для расчета ПИД-регуляторов. Он является эмпирическим и использует экспериментальные данные [37]. Это, безусловно, самый популярный метод настройки в использовании и до сих пор является простым, довольно эффективным методом настройки ПИД-регуляторов [39].

Есть два метода, предложенных Циглером и Николсом. Предлагаемая настройка Циглера-Николса приведена в таблице 1.2. Этот метод был использован для настройки ПИД-регуляторов для систем шпиндельных двигателей [40].

Для фиксации системы на границе устойчивости (для фиксации  $k_{\Pi}^*$ ), следует увеличить  $K_{\Pi}$ , то есть установить неизменную амплитуду колебаний. При коэффициенте регулятора  $k_{\Pi}^*$ , система остается на границе устойчивости. В

установившейся системе колебаний графо-аналитически измеряют период  $T^*$ . Значения параметров регулятора рассчитываются по формулам из таблицы 1.3.

Таблица 1.3 – Типовые параметры регуляторов

	$k_{\Pi}$	$k_{\Pi}$	$k_{\text{д}}$
П-регулятор	$0,50 k_{\Pi}^*$		
ПИ-регулятор	$0,45 k_{\Pi}^*$	$0,54 k_{\Pi}^*/T^*$	
ПИД-регулятор	$0,60 k_{\Pi}^*$	$1,2 k_{\Pi}^*/T^*$	$0,075 k_{\Pi}^*T^*$

Во втором варианте этого метода ключевым звеном является реакция объекта на изменение управляющего воздействия.

Данную характеристику называют кривой разгона. Объекты имеющие апериодическую кривую, как на рисунке 1.9, на котором представлена кривая разгона объекта с запаздыванием, которые могут быть интерпретированы как последовательное соединение апериодического звена и звена чистого запаздывания.

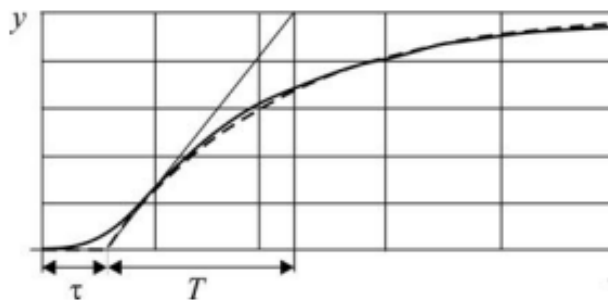


Рисунок 1.9 – Ступенчатое воздействие при реакции объекта

Здесь передаточная функция имеет вид:

$$W_o(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (1.11)$$

где  $k$  – коэффициент передачи,  $T$  – постоянная времени,  $\tau$  – время запаздывания.

Благодаря выше указанным параметрам  $k$ ,  $T$ ,  $\tau$ , ведутся расчеты регулятора. Формулы для параметров регулятора приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры регулятора

	$k_{\pi}$	$k_{\eta}$	$k_d$
П-регулятор	$T/k\tau$		
ПИ-регулятор	$0,9T/k\tau$	$0,3T/k\tau^2$	
ПИД-регулятор	$1,2T/k\tau$	$0,6T/k\tau^2$	$0,6T/k$

При данном методе, удовлетворительные результаты получаются при  $0,15 < \tau/T < 0,6$ .

Методом Циглера и Николса всегда существует необходимость дальнейшей настройки, потому что полученные настройки контроллера являются довольно «агрессивными» и, таким образом, приводят к чрезмерному превышению и колебательному отклику. Также для первого метода параметры довольно сложно оценить в шумной обстановке. Во втором методе, поскольку система движется к неустойчивости при определении параметров, практически это может быть весьма вредным для системы.

Регуляторы, рассчитанные с помощью метода Циглера – Никольса, не всегда способны обеспечить качество процесса регулирования. Несмотря на это, метод Циглера–Никольса имеет свою популярность, именно поэтому ряд производителей рекомендуют их для настройки регуляторов [18].

#### 1.6 Влияние запаздывания на устойчивость замкнутой системы

Для того чтобы увидеть влияние запаздывания на систему смоделируем работу двух одинаково настроенных систем, разница лишь будет состоять в присутствии в одной из них звена запаздывания, системы (а) и (б) (рисунок 3.3).

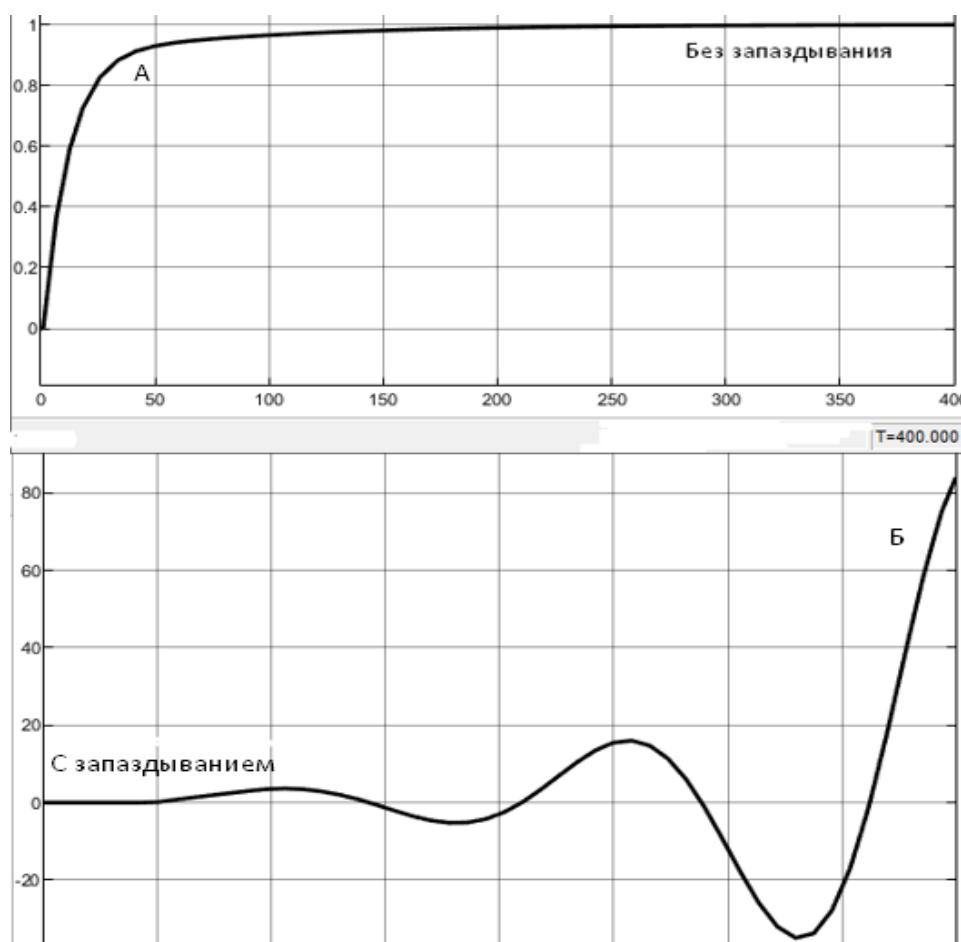


Рисунок 3.3 – Система без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), с система с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б)

Из данного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что звено запаздывания негативно влияет на систему. На рисунке 3.3б видно, где система становится неустойчивой.

Системы автоматического управления (САУ) могут иметь звенья, у которых зависимость между выходной и входной характеристиками имеет вид:  $y(t) = u(t - \tau)$ , где  $\tau$  — постоянная величина, называемая временем запаздывания.

Так как данные звенья могут воспроизводить входную величину (с некоторым запаздыванием), их стали называть запаздывающими. На рисунке 1.14 представлена одноконтурная структура САУ со звеном запаздывания.



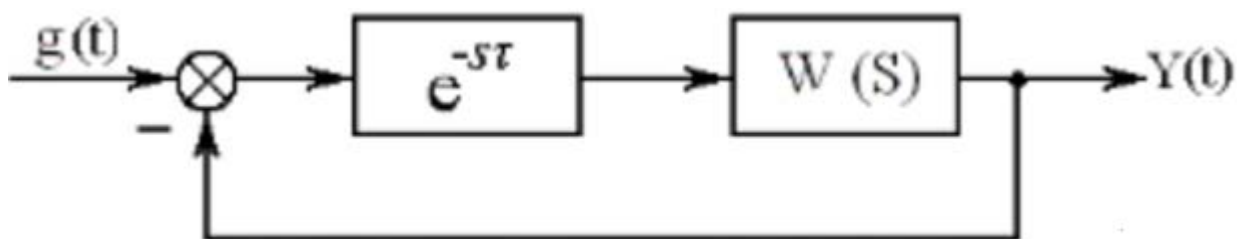


Рисунок 1.14 - Система автоматического управления с запаздыванием

Передаточная функция звена запаздывания:

$$W_{\text{зап}}(S) = e^{-s\tau} \quad (1.19)$$

Примерами, в которых можно обнаружить звенья с запаздыванием, могут служить технологические процессы где происходит перемещение из одной точки в другую продуктов производства или материалов. Процессы в данных САУ можно описывать дифференциально разностными уравнениями, САУ которые имеют в себе хотя бы одно звено запаздывания характеризуют как САУ с запаздыванием. Благодаря передаточным функциям систем с сосредоточенными параметрами и системам высокого порядка с сосредоточенными параметрами, появляется возможность аппроксимировать передаточные функции сложных систем. Структуру со звеном в прямой цепи можно представить, как на рисунке 1.14.

Разомкнутая система с запаздывающим звеном представляется передаточной функцией:

$$W_{\tau}(s) = W_{\text{зап}}(s)W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)} e^{-s\tau} \quad (1.20)$$

где  $W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)}$  — дробно рациональная функция оператора  $S$  (без звена запаздывания, если есть множество звеньев запаздывания то они складываются).

Передаточную функцию замкнутой системы (если в прямой цепи находится звено запаздывания), можно представить, как:

$$W_{gx}(p) = \frac{W_\tau(s)}{1+W_\tau(s)} = \frac{R(s)e^{-s\tau}}{Q(s)+R(s)e^{-s\tau}} = \frac{R_\tau(s)}{D_\tau(s)} \quad (1.21)$$

Из выше упомянутого выражения (1.21) можно сказать, что звено запаздывания влияет на характеристическое уравнение:

$$D_\tau(s) = Q(s) + R(s)e^{-s\tau} \quad (1.22)$$

В выше упомянутом характеристическом выражении, можно утверждать, что оно трансцендентное (и является выражением «бесконечной степени») так как присутствует и имеет бесконечное количество корней. В связи с тем, что:

$$e^{-s\tau} = 1 - s\tau + \frac{s^2\tau^2}{2!} - \frac{s^3\tau^3}{3!} + \dots,$$

Для устойчивости систем с запаздыванием, необходимо чтобы найденные корни были левыми, но, к сожалению, обнаружение корней уравнения проблематично, в связи с этим при их обнаружении пользуются критериями устойчивости, например, критериями устойчивости Найквиста или критериями устойчивости Михайлова.

Чтобы получить выражение для годографа Михайлова необходимо подставить  $s=j\omega$  в характеристическое уравнение:

$$D_\tau(j\omega, e^{j\omega\tau}) = Q(j\omega) + R(j\omega)e^{-j\omega\tau} \quad (1.23)$$

С помощью критерия Михайлова, к сожалению, график кривой Михайлова становится трудным для восприятия и формулировка этого критерия не такая простая из за присутствия  $e^{-j\omega\tau}$ , и тогда более удобный критерий – критерий Найквиста.

Информацию о том устойчива ли система можно получить исходя из амплитудно-фазовой характеристики (АФХ)  $W_\tau(j\omega)$  системы относительно точки  $(-1; j0)$ . Частотную передаточную функцию  $W_\tau(j\omega)$  системы с

запаздыванием находят, подставляя  $s=j\omega$  в выражение:

$$W_\tau(s) = W_{\text{зап}}(s)W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)} e^{-s\tau} \quad (1.24)$$

Откуда можно утверждать, что:

$$W_\tau(j\omega) = W_{\text{зап}}(j\omega)e^{-j\omega\tau} = A(\omega)e^{-s\omega\tau}e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi_\tau(\omega)} \quad (1.25)$$

где  $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$  - АФХ системы без учета запаздывания;  
 $A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$  - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);  $\varphi(\omega) = \text{Arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$  - фазочастотная характеристика (ФЧХ) разомкнутой системы без учета запаздывания;  $\varphi_\tau(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$  - фазочастотная характеристика (ФЧХ) разомкнутой системы с запаздыванием.

Из  $W_\tau(j\omega) = W_{\text{зап}}(j\omega)e^{-j\omega\tau} = A(\omega)e^{-s\omega\tau}e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi_\tau(\omega)}$  и  $\varphi_\tau(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$  видно, что присутствие звена запаздывания не изменяет модуля  $A(\omega)$  АФХ системы  $W_\tau(j\omega)$ , а приносит только добавочный отрицательный сдвиг по фазе  $\omega\tau$  пропорциональный частоте, при этом коэффициентом пропорциональности является время запаздывания  $\tau$ .

Зная АФХ  $W(j\omega)$  системы без запаздывания, легко построить АФХ  $W_\tau(j\omega)$  системы с запаздыванием. Для этого каждый модуль  $A(\omega_j)$  вектора АФХ  $W(j\omega)$  нужно повернуть на угол  $\omega_j\tau$  по часовой стрелке. С ростом частоты  $\omega$  угол  $\omega\tau$  будет быстро расти, а модуль  $A(\omega)$  обычно уменьшается, поэтому амплитудно-фазовая характеристика  $W_\tau(j\omega)$  разомкнутой системы с запаздыванием имеет вид спирали, закручивающейся вокруг начала координат, что показано на рисунке 1.15.

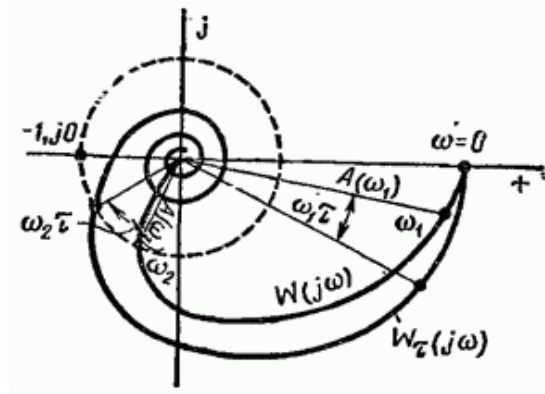


Рисунок 1.15 - АФХ  $W_\tau(j\omega)$

«Закручивание» АФХ из-за присутствия дополнительного фазового сдвига  $\omega\tau$ , ухудшает устойчивость системы, так как вся АФХ приближается к критической точке  $(-1, j0)$ . Однако, иногда при сложной форме АФХ  $W(j\omega)$  введение постоянного запаздывания может улучшить условия устойчивости. Меняя запаздывания  $\tau$ , возможно получить значение, при котором система окажется на границе устойчивости, тогда характеристика  $W_\tau(j\omega)$  будет проходить через точку  $(-1, j0)$ . Время запаздывания  $\tau_{кр}$  и соответствующее ему значение частоты  $\omega_{кр}$  при которых  $W_\tau(j\omega)$  проходит через точку  $(-1, j0)$  называют критическими и для такого критического случая существует условие:

$$W_\tau(j\omega_{кр}) = W(j\omega_{кр})e^{-j\omega_{кр}\tau_{кр}} = A(\omega_{кр})e^{j[\varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр}]} = -1 \quad (1.26)$$

Откуда можно записать отдельно для амплитуд и фаз вектора  $W_\tau(j\omega_{кр})$ :

$$A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1, \quad (1.27)$$

$$\varphi_\tau(\omega_{кр}) = \varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр} = -\pi(2j + 1) \text{ где } j=0, 1, 2, \dots$$

Из  $A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1$  можно найти сначала  $\omega_{кр}$  а затем из  $\varphi_\tau(\omega_{кр}) = \varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр} = -\pi(2j + 1)$  найти  $\tau_{кр}$  т. е.

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi(2j + 1)}{\omega_{кр}} = \frac{\pi + \varphi(\omega_{кр})}{\omega_{кр}} + \frac{2\pi}{\omega_{кр}}j, \quad (1.28)$$

Для САУ с запаздыванием основное значение имеет минимальное критическое время запаздывания (при  $j=0$ ), которое является в то же время и граничным:

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}} = \frac{\pi + \text{Arctg} \frac{V(\omega_{кр})}{U(\omega_{кр})}}{\omega_{кр}} = \frac{\varphi(\omega_{кр})}{\omega_{кр}} \quad (1.29)$$

где  $\varphi(\omega_{кр}) = \pi + \text{Arctg} \frac{V(\omega_{кр})}{U(\omega_{кр})}$  — запас устойчивости по фазе.

При сложном выводе выражения  $W(j\omega)$  определение критического времени запаздывания легче всего выполнить графически. Условие  $A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1$  определяется пересечением годографа  $W(j\omega)$  с окружностью единичного радиуса с центром в начале координат (рисунок 1.16).

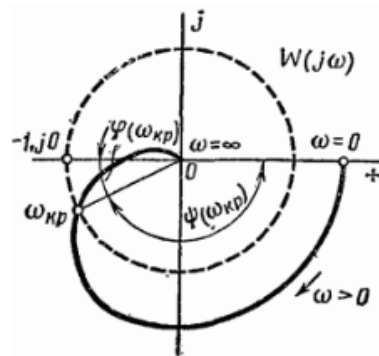


Рисунок 1.16 - Годограф  $W(j\omega)$

Точка пересечения определяет одновременно  $\omega_{кр}$  и угол  $\varphi(\omega_{кр})$ , который, будучи разделен на  $\omega_{кр}$ , даст значение критического времени запаздывания. Если имеется несколько точек пересечения годографа  $W(j\omega)$  с окружностью единичного радиуса, например при  $\omega_{1кр}$ ,  $\omega_{2кр}$  и  $\omega_{3кр}$ , (рисунок 1.17), то система будет иметь несколько критических граничных времен запаздывания:

$$\tau_{1кр} = \frac{\varphi(\omega_{1кр})}{\omega_{1кр}}; \tau_{2кр} = \frac{\varphi(\omega_{2кр})}{\omega_{2кр}}; \tau_{3кр} = \frac{\varphi(\omega_{3кр})}{\omega_{3кр}}$$

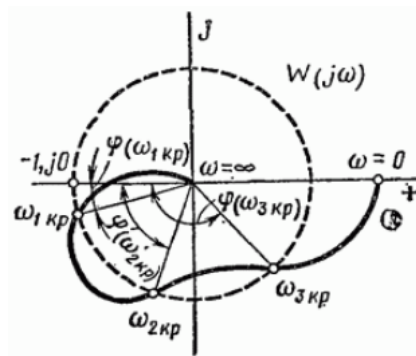


Рисунок 1.17 – Годограф  $W(j\omega)$  при нескольких критических граничных времен запаздывания

При этом минимальное время запаздывания равно  $\tau_{кр\ min} = \tau_{1кр}$ .

Система будет устойчива при  $\tau < \tau_{1кр}$ , а также при  $\tau_{2кр} < \tau < \tau_{3кр}$ .

Система будет неустойчива при  $\tau_{1кр} < \tau < \tau_{2кр}$ , а также при  $\tau > \tau_{3кр}$ .

Наблюдаемое в этом случае чередование участков устойчивости и неустойчивости системы при непрерывном изменении  $\tau$  является отличительной особенностью систем с запаздыванием.

Очень часто для повышения быстродействия и точности системы время запаздывания  $\tau$  стремятся уменьшить, поэтому критерий устойчивости формулируется лишь для минимального времени запаздывания. САУ будет устойчива, если время запаздывания  $\tau$  меньше минимального критического времени запаздывания:  $\tau < \tau_{кр\ min}$ .

Стоит отметить, что критическое время запаздывания находят даже тогда, когда используются логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) характеристики и ФЧХ характеристики, но тогда вместо окружности единичного радиуса представляют ось абсцисс, и ЛАЧХ системы без запаздывания совпадает с ЛАЧХ системы с запаздыванием. Фазовый сдвиг определяют из выражения  $\varphi_\tau(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$ . Точки пересечения ЛАЧХ с осью абсцисс определяют критические частоты  $\omega_{кр}$ , а запасы по фазе (с учетом кратности), отнесенные к

соответствующем критическим частотам, определяют критические времена запаздывания  $\tau_{jкр}$  [47].

### 1.7 Регулятор Смита для систем с запаздыванием

Временные задержки являются обычным явлением во многих производственных процессах, и они вызывают осложнения связанные с управлением процессами. ПИД - регуляторы часто неэффективны для управления такими процессами, поскольку для поддержания стабильности замкнутого контура требуется тщательная настройка коэффициентов. Смит представил компенсатор задержки, который более широко известный сейчас как предиктор Смита.

Контроллер включает в себя модель процесса, что позволяет прогнозировать переменные процесса, и контроллер может быть спроектирован так, как если бы процесс был свободным от задержек. Предиктор Смита предлагает улучшение в производительности замкнутого контура по сравнению с обычными контроллерами, и он был распространен на многопараметрические системы с задержками. Однако, как и другие основанные на моделях системы управления, контроллер Смит-предиктор требует очень точной модели процесса. При несоответствии между моделью и фактическим процессом производительность замкнутого цикла может быть очень низкой. Фактически было показано, что системы Смита могут стать нестабильными даже при бесконечно малых возмущениях в «универсальных счетах» для выбора ширины полосы замкнутого контура, учитывая неопределенность, связанную с временем простоя процесса. Тем не менее, во всех этих исследованиях не учитывалось влияние одновременных неопределенностей в коэффициенте усиления, постоянной времени и времени простоя на надежность работы контроллеров-предикторов Смита [45-46].

Предиктор Смита – это регулятор способный предсказать сигнал на выходе. Для этого он может использовать модель объекта, которая в свою очередь состоит из  $M_0$  и задержки  $e^{-sL}$  (рисунок 1.11). Благодаря этому,

существует возможность исключить задержку и возможно до появления сигнала на выходе понять поведение объекта. Данный факт говорит о том, что реализация возможна системой, представленной на рисунке 1.11, где  $R$  - ПИД-регулятор,  $P_o e^{-sL}$  - передаточная характеристика объекта.

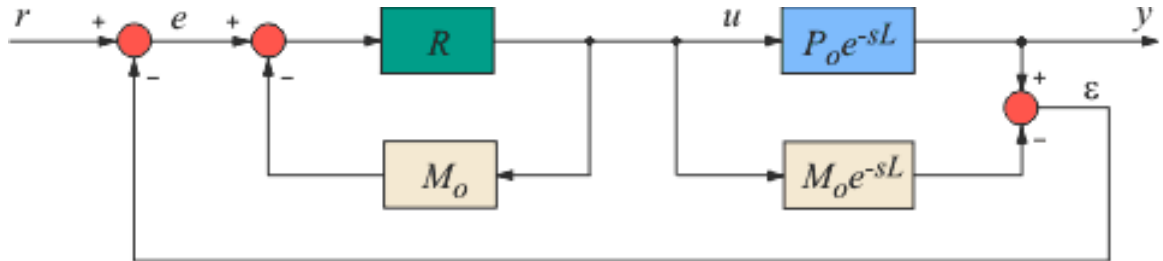


Рисунок 1.11 – Система с предиктором Смита

Исходя из того что предполагаем модель точна, то разность сигналов на выходах модели и объекта равна нулю,  $\varepsilon = 0$ , тогда из рисунка 1.12 получаем:

$$y = P_o e^{-sL} \left( \frac{R}{1 + R M_o} \right) r = \left( \frac{P_o R}{1 + P_o R} e^{-sL} \right) r \quad (1.14)$$

Здесь  $\frac{P_o R}{1 + P_o R}$  - функция без транспортной задержки. Это говорит о том, что звено с задержкой отсутствует в контуре ОС и не влияет на устойчивость и быстродействие системы, в связи с тем, что происходит регулирование в контуре без задержки.

Рассмотрим теперь работу предиктора без варианта, в котором разность не равна нулю, это можно описать следующей системой уравнений:

$$y = P_o e^{-sL} R(r - \varepsilon - M_o u), \quad \varepsilon = y - M_o e^{-sL} u, \quad y = P_o e^{-sL} u, \quad (1.15)$$

Из чего следует

$$y = \left[ \frac{P_o R}{1 + R M_o + R(P_o - M_o)e^{-sL}} r \right] e^{-sL} \quad (1.16)$$



Очевидно, что с ростом разности  $P_0 - M_0$  в знаменатель стремится к нулю и из передаточной функции исключается звено задержки, которая только добавляется к результату [19].

Рассмотрим более подробно вывод передаточной функции регулятора Смита:

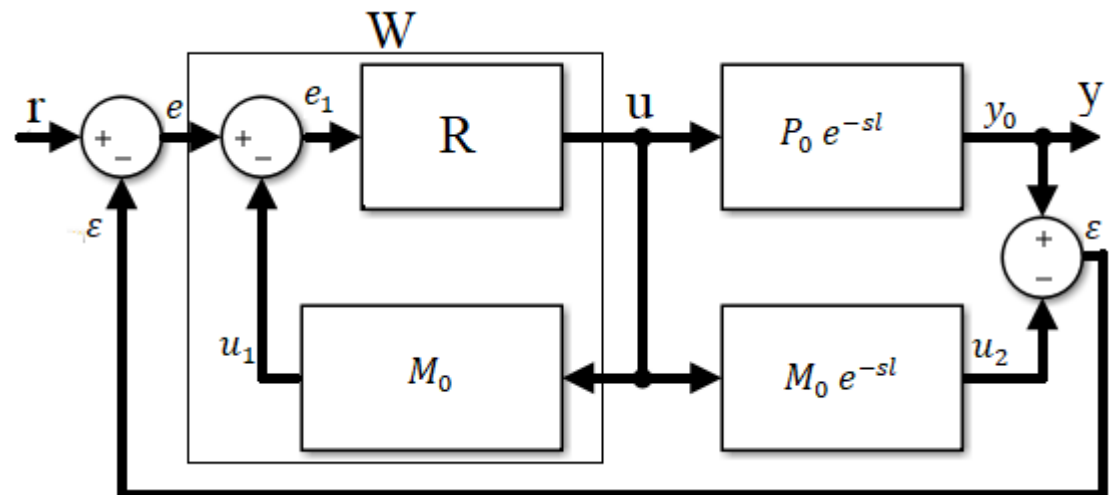


Рисунок 1.12 – Структура регулятора Смита

Если посмотреть на часть структурной схемы которая обозначена за W на рисунке 1.12, то можно увидеть что данная часть схемы состоит из дробно-рациональной части  $M_0$  и ПИД регулятора R, найдем W:

$$e_1 = e - u_1, u = R \cdot e_1, u_1 = u \cdot M_0, \frac{u}{R} = e - u \cdot M_0, u \cdot \left( \frac{1}{R} + M_0 \right) = e,$$

$$W = \frac{u}{\varepsilon} = \frac{R}{1 + R \cdot M_0}. (1.17)$$

После обнаружения W, отредактируем структурную схему для удобства:

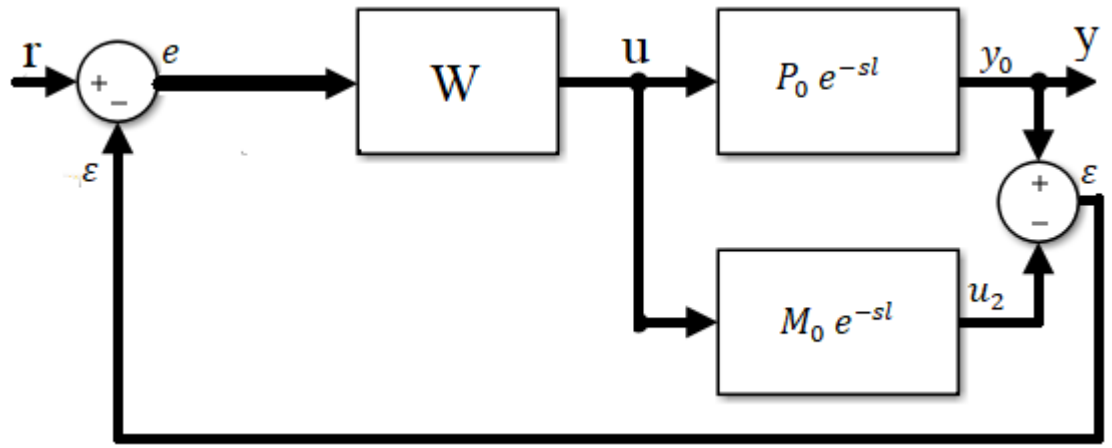


Рисунок 1.13 – структура регулятора Смита

Далее найдем  $W_{\text{общ}}$ , которое состоит из ранее найденного  $W$ , передаточной характеристики объекта управления с задержкой  $P_0 \cdot e^{-sl}$  и передаточной характеристики модели объекта с задержкой  $M_0 \cdot e^{-sl}$ .

$$y_0 = u \cdot P_0 e^{-sl}, u_2 = u \cdot M_0 e^{-sl}, \varepsilon = y_0 - u_2 = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl} - u \cdot M_0 \cdot e^{-sl} = u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), e = r - \varepsilon, y = y_0 = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl}, y = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl}, u = W \cdot (r - \varepsilon), \varepsilon = u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), u = W \cdot (r - u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})), u = W \cdot r - W \cdot u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), u \cdot (1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})) = \frac{W \cdot r}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})}, u = \frac{W \cdot r}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})},$$

$$W_{\text{общ}} = \frac{W \cdot P_0 \cdot e^{-sl}}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})}, (1.18)$$

Где

$$W = \frac{R}{1 + R \cdot M_0}, R - \text{передаточная функция ПИД регулятора.}$$

## 2 Объект и методы исследования

### 2.1 Описание стенда физического подобия технологического процесса и средств исследования

В данной работе используется объект, представленный на рисунке 2.1, который в свою очередь состоит из двух емкостей: емкость E1 - основная, емкость E2 – вспомогательная. В основную емкость встроен датчик жидкостного уровня (3), который измеряет давление столба жидкости.

Насос (8) обеспечивает переливание жидкости по трубопроводу (4) в основную из вспомогательной емкости. Жидкость во вспомогательной емкости вновь оказывается посредством открытия шарового клапана (5) и слива из основной. Незаполненный трубопровод выполняет функции звена с чистым запаздыванием. Формирование аналогового выходного сигнала происходит вследствие поступления результатов измерений в регулятор, где сигнал непосредственно поступает в частотный преобразователь. Данный преобразователь производит управление производительностью насоса, изменяя частоту, изменяет производительность насоса. Для данного объекта возмущающими воздействиями являются величина регулируемой величины, (ее задает регулятор) и величина открытия ручного клапана.

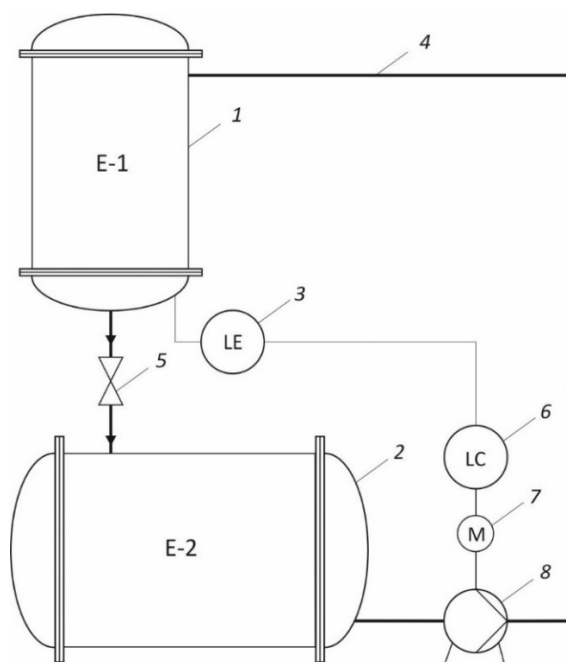


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение объекта управления

1 – основная емкость; 2 – вспомогательная ёмкость; 3 – датчик жидкостного уровня; 4 – линия запаздывания; 5 – кран шаровый полнопроходной; 6 – регулятор уровня; 7 – привод насоса; 8 – насос

Данный ПЧВ (преобразователь частоты векторный) обладает следующими основными характеристиками: питание 220В или 380В; выходная частота до 50Гц (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – ПЧВ

Важной частью любой автоматизированной системой управления технологическим процессом является её интеллектуальная часть, реализуемая в настоящее время обычно на базе ПЛК (программируемого логического контроллера) (рисунок 2.3).

Контроллер решает ряд типовых задач:

- измерение и преобразование входных аналоговых и дискретных сигналов;
- первичная обработка сигналов;
- вычислительные операции;

- формирование выходных аналоговых или дискретных сигналов управления.

В связи с этим к контроллеру предъявляется ряд требований, которые определяются как технологическим процессом, так и организационными особенностями компании-производителя, а именно:

- информационная мощность, т. е. возможность одновременной обработки измеряемых сигналов и формирования управляющих сигналов, вычислительные возможности процессора, объём памяти и т.д.;

- конструктивное исполнение (модульность, степень интеграции модулей, возможность быстрой замены модулей, в т. ч. горячей замены без остановки технологического процесса, ремонтпригодность и т.д.);

- наличие сервисных центров и центров поддержки потребителей оборудования.

- и т. д.

Основным правилом при выборе ПЛК должен быть прагматизм, который заключается в соответствии цены и качества контроллера важности процесса, который он автоматизирует.

В данной системе, как и во множестве других, небольших автоматизированных системах регулирования, используется отечественный контроллер ОВЕН ПЛК 150. Схема подключения питания, дискретных и аналоговых входов и выходов ПЛК 150 представлена на рисунке 2.3.

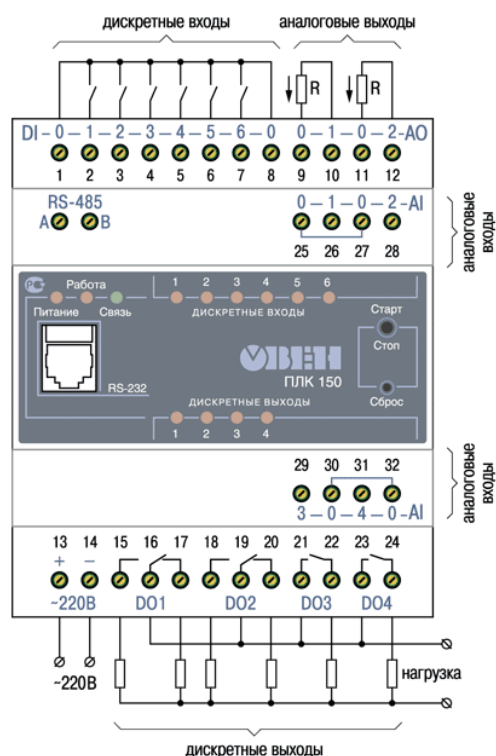


Рисунок 2.3 – Схема входов и выходов, и разъемов питания

Данный контроллер обладает следующими параметрами и характеристиками: Процессор RISC ARM9 (180МГц); RAM (random access memory) 8МБ; ROM (read only memory) 4МБ; SRAM (static random access memory) 16КБ, а также отсутствие операционной системы; скорость дискретных входов 10КГц; наличие аналоговых входов и выходов; наличие интерфейсов Ethernet (а также RS-232, RS-485, используя радио, GSM, ADSL модемы); рабочая температура от -20 до +70 °С; возможности самодиагностики; часы реального времени; встроенный аккумулятор; возможность сохранять архивы на внешний носитель; набор готовых программных модулей, предоставляемых бесплатно; расширение точек ввода\вывода.

Для создания управляющей программы используется среда Codesys (Controller Development System) — это специализированное программное обеспечение, предназначенное для промышленной автоматизации, разработанное компанией 3S-Smart Software Solutions в Германии. Программное обеспечение Codesys распространяется свободно и для того чтобы производители технических средств могли воспользоваться этой средой, они

разрабатывают специальные драйверы, обеспечивающие связь технического средства (ПЛК) с Codesys. Codesys предоставляет пользователю языки программирования стандарта МЭК 61131-3. В данный момент Codesys широко используется для большой массы контроллеров. На сегодняшний день более 300 компаний в мире выпускают на рынок контроллеров продукцию с программным обеспечением Codesys в качестве рекомендуемого штатного инструмента программирования ПЛК.

Для процесса моделирования используется программный продукт MATLAB Simulink. Данная программа – это среда моделирования сложных технических систем и основной инструмент для модельно-ориентированного проектирования. В основе работы его лежит построение графических схем и выстраиваемый набор блоков. Данная среда широко применяется в сфере автоматизации и цифровой обработке сигналов.

### 3 Экспериментальная часть работы

#### 3.1 Идентификация объекта управления

Идентификация объекта управления - это процесс получения математической модели объекта. Одним из широко распространённых способов идентификации объектов управления является графический способ по переходной характеристике или кривой разгона. Кривая разгона – это кривая, полученная в результате реакции объекта на входное ступенчатое воздействие. Кривая разгона или переходная характеристика  $h(t)$  – это реакция объекта управления на ступенчатое входное воздействие. По этой кривой разгона определяются динамические характеристики объекта управления.

Прежде чем совершить идентификацию системы необходимо слить всю жидкость из основной в вспомогательную.

Процесс получения кривой разгона происходит следующим образом. Количество воды в емкости растет линейно, при воздействии на входе которое имеет постоянный характер. Если представить, что звено идеально интегрирующее (при бесконечном количестве воды и объеме емкости), но тут существует ряд ограничений (количество воды и объем емкости, и ограниченный возможный объем перекачки насосом). В идеальном случае объект можно представить в виде идеального интегрирующего звена при наличии бесконечно большой емкости и неограниченного количества жидкости. Чтобы определить график кривой разгона вода до минимума из основной емкости переливается в вспомогательную. Затем, производится перевод регулятора на ручной режим, где требуется зафиксировать время подачи ступенчатого воздействия, то есть изменения управляющего сигнала на частотный преобразователь, что существенно может увеличить или уменьшить производительность насоса. На рисунке 3.1 изображен график кривой разгона системы. Входное ступенчатое воздействие – ступенчатая подача воды насосом.



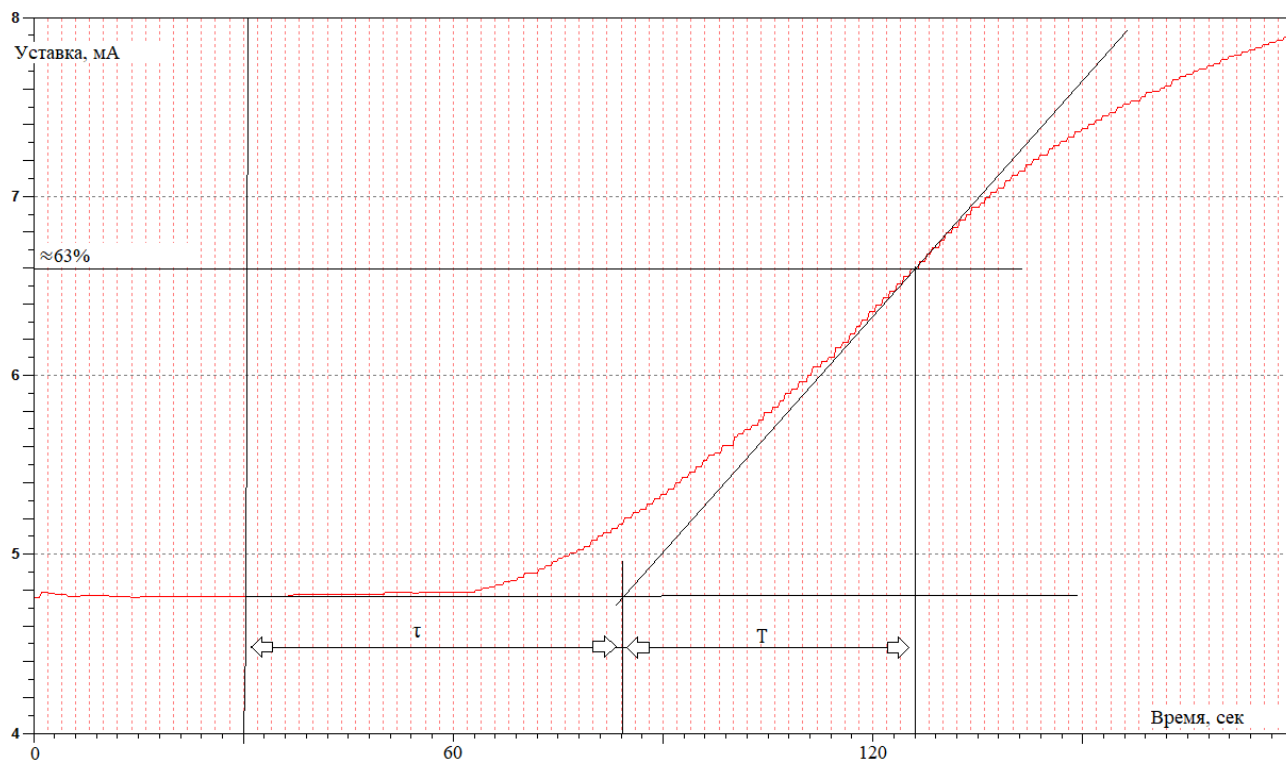


Рисунок 3.1 – Кривая разгона объекта при ступенчатом входном воздействии

Передаточная функция объекта управления принимается в виде апериодического звена с чистым запаздыванием

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} \cdot e^{-\tau \cdot s},$$

где  $\tau$  – интервал времени от момента подачи входного сигнала до момента начала изменений в системе системы (или время запаздывания);  $T$  – постоянная времени объекта;  $k$  – коэффициент передачи (отношение установившегося значения выходной величины к величине ступенчатого входного сигнала,  $k = 1,3$ ). По данной кривой определяется время запаздывания  $\tau = 55$  секунд и постоянная времени  $T = 47$  с. Таким образом, с учётом полученных значений передаточную функцию объекта управления можем записать в следующем виде:

$$W(s) = \frac{1,3}{47s+1} \cdot e^{-55s} \quad (3.1)$$

При настройке регулятора традиционными способами настройки регулятора возможны трудности, так как соотношение  $\tau/T > 1$ . Данное соотношение является ориентиром для инженера-проектировщика при выборе типа регулятора. Если  $0,2 < \tau/T < 1$ , рекомендуется использовать ПИД или ПИ

регулятор (непрерывный или цифровой), если  $\tau/T < 0,2$  то цифровой или непрерывный регулятор. Если же данное соотношение больше единицы, то существует необходимость компенсировать запаздывание в контуре системы управления. Для этого используются регуляторы с упредителем, который осуществляет компенсацию. Необходимо отметить, что данный регулятор возможно применять и при меньших соотношениях.

### 3.2 Исследование и моделирование систем с регулятором Смита и ПИД-регулятором в среде Matlab Simulink

Прежде чем провести исследования на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием, необходимо и немаловажно провести исследование моделирования данных систем, которое позволяет оценить возможное поведение реального объекта и избежать грубых ошибок, а также не столкнуться с лишними экспериментальными работами. Результаты моделирования нельзя считать абсолютно достоверными ввиду того, что они базируются на математической модели объекта, которая не учитывает всех особенностей объекта и в любом случае является неточной. Однако результаты, полученные в процессе моделирования и исследования систем, являются важными по уже перечисленным выше причинам. Немаловажными являются показатели качества переходных процессов,  $T_p$ -время регулирования и  $\sigma$ - перерегулирование, так как с помощью них мы можем в более полном объеме оценить переходной процесс. Время регулирования - это время переходного процесса, за которое регулируемая величина выйдет на заданное значение уставки и будет оставаться на заданном значении. Перерегулирование – это максимальное отклонение переходного процесса от значения уставки, в процессе регулирования, возможно оценить в процентах как:  $\sigma = \frac{|h_{\max}(t) - h_{уст}(t)|}{h_{уст}(t)} * 100\%$ , здесь  $h_{\max}(t)$  – максимальное отклонение регулируемой величины и  $h_{уст}(t)$  – установившееся значение регулируемой величины.

Модели систем: без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б) и система с запаздыванием содержащая регулятор Смита (в) – представлены на рисунке 3.2 соответственно.

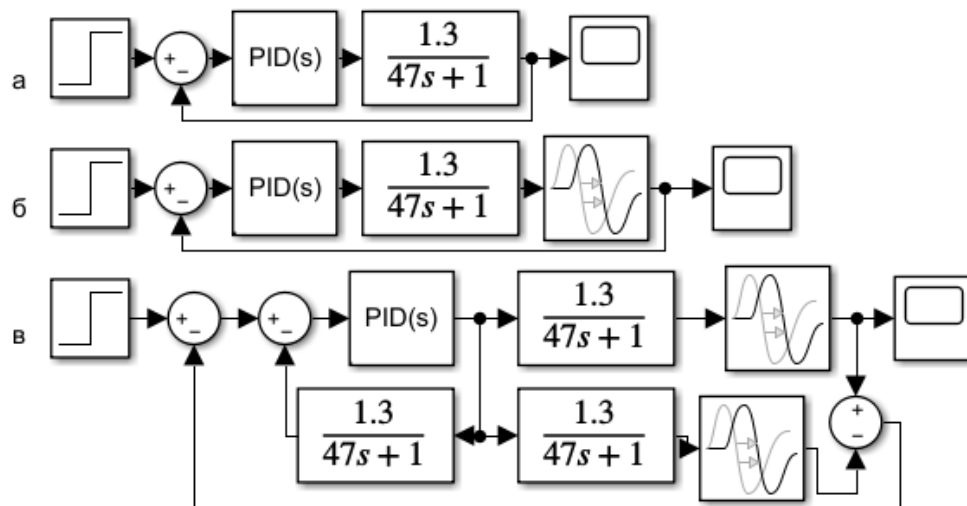


Рисунок 3.2 – Система без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б) и система с запаздыванием содержащая регулятор Смита (в)

Для более полного понимания работы систем, настроим коэффициенты ПИД регуляторов и промоделируем работу данных моделей (рисунок 3.2 а,б,в).

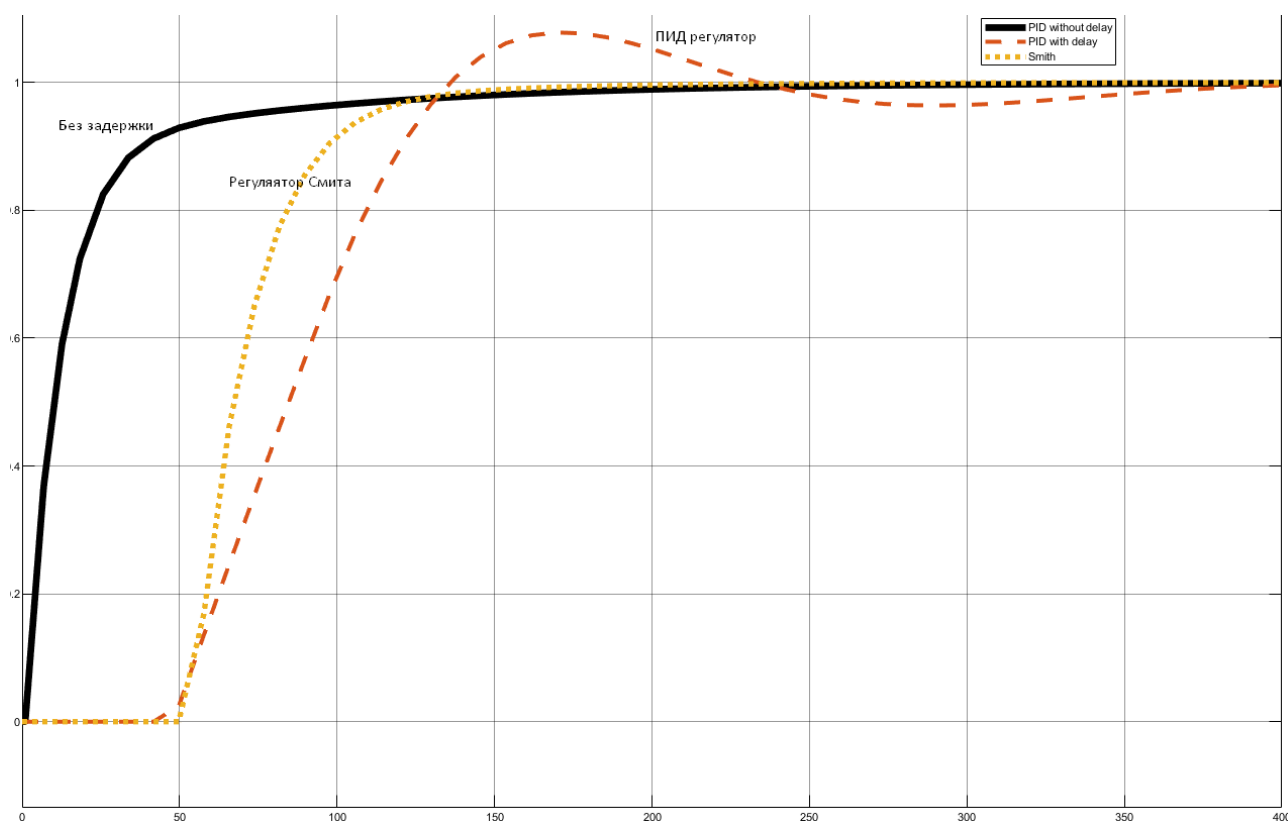


Рисунок 3.3 – Работа системы без запаздывания содержащая ПИД регулятор, работа системы с запаздыванием содержащая ПИД регулятор и работа системы с запаздыванием содержащая регулятор Смита

Благодаря данному исследованию можно всецело утверждать о том, что регулятор Смита способен сводить к минимуму влияние запаздывания на систему, что очень хорошо видно из рисунка 3.3. В сравнении с ПИД регулятором, Смит регулятор - без перерегулирования, за минимально возможное время регулирования, выходит на заданное значение, чем и характеризует себя подходящим для систем с транспортным запаздыванием, далее результаты моделирования (рисунок 3.3) сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнение работ моделей систем с запаздыванием

Тип системы	Показатели качества	
	Б, %	T <sub>p</sub> , сек
Система без запаздывания	0	250
Система с запаздыванием содержащая ПИД регулятор	10	400
Система с запаздыванием содержащая регулятор Смита	0	250

3.3 Исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием

После вышесказанного литературного обзора и первичных исследований моделей систем с звеном запаздывания, необходимо произвести аналогичные исследования на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием.

Для создания управляющих программ, необходимо перейти от уравнения передаточной функции объекта управления к разностному уравнению:

$$W(s) = \frac{1}{Ts+1} * e^{-\tau s}, \quad (3.2)$$

Или

$$Y(s) = \frac{1}{Ts+1} * e^{-\tau s} * X(s). \quad (3.3)$$

После чего перейдём к дифференциальному уравнению, заменив  $s = \frac{d}{dt}$ ;

$$T \frac{dy}{dt} + y = x(t - \tau). \quad (3.4)$$

Перейдем к разностному уравнению:

$$T \frac{y[n+1]-y[n]}{\Delta t} + y[n] = x[n - k\Delta t]; \quad (3.5)$$

$$y[n + 1] = \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) * y[n] + \frac{\Delta t}{T} * x[n - k\Delta t], \quad (3.6)$$

где  $\Delta t$  - шаг дискретизации;  $\tau = k * \Delta t$  - время запаздывания.

Полученное разностное выражение необходимо использовать как модель объекта управления. На рисунке 3.4 приведены обозначения сигналов, вычисление которых производится в программе контроллера.

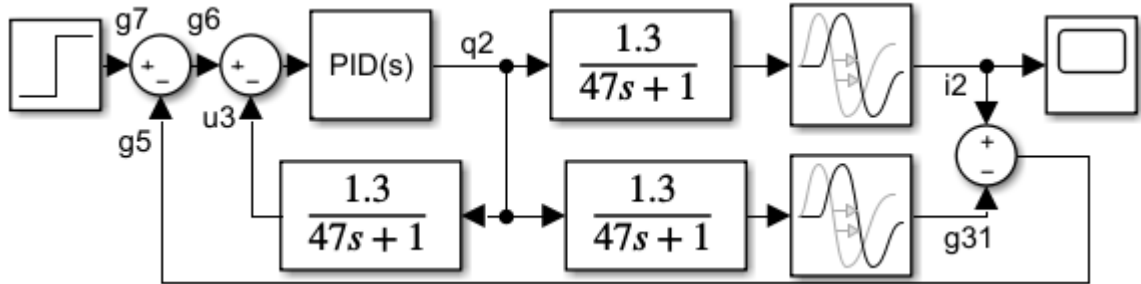


Рисунок 3.4 – Система регулирования с регулятором Смита

Ниже представлен программный код на языке ST, реализующая модель объекта. Реализацию модели объекта осуществляется на одном из языков стандарта IEC 61131-3, если быть более точным на языке ST:

```

FOR i:= 0 TO 58 DO;
    c[60-i] :=c[59-i];
END_FOR;
c[1] :=q2;
T:=47;
u1 :=(1-1/T)*u2+1.29*q2*(1/T) ;
u2 :=u1 ;
u3 :=4+u1*16/100 ;
g3 :=(1-1/T)*g4+1/T*c[55]*1.29 ;
g4 :=g3 ;
g31 :=4+g3*16/100 ;
g5 :=i2-g31 ;
g6 :=g7-g5 ;

```

$$q_{10} := q_2 ;$$

В соответствии с данной программой происходит работа стенда физического подобия, для полного понимания функционирования программы необходимо понимать следующие обозначения:

$c[1]$  – массив значений с регулятора;

$u_1$  – выход модели объекта без запаздывания;

$u_2$  – выход модели объекта без запаздывания на предыдущем шаге;

$u_3$  – масштабирование сигнала  $u_1$ ;

$g_3$  – выход модели объекта с запаздыванием;

$g_4$  – выход модели объекта с запаздыванием на предыдущем шаге;

$g_{31}$  – масштабирование сигнала  $g_3$ ;

$g_5$  – разность реального объекта с моделью;

$g_7$  – уставка;

$g_6$  – сигнал рассогласования между уставкой  $g_7$  и разностью реального объекта с моделью  $g_5$ ;

$q_{10}$  – управляющий сигнал двигателем;

$q_2$  – выходной сигнал регулятора в диапазоне;

$i_2$  – входной сигнал измерения уровня.

Для формирования управляющего воздействия в данной программе необходимо использовать блок ПИД регулятора (рисунок 3.5), так как он создает управляющее воздействие  $Y$  на механизм исполнения в соответствии с величиной рассогласования  $e(t)$ , которая равна разности входного сигнала и уставки регулятора.

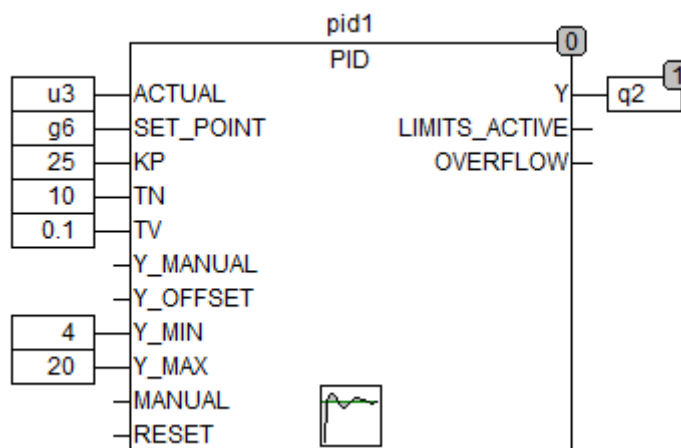


Рисунок 3.5 – Программный блок ПИД регулятора

Данное управляющее воздействие формируется в соответствии с выражением:

$$Y = Y\_OFFSET + KP(e(t) + \frac{1}{TN} \int_0^{TN} e(t) + TV \frac{de(t)}{dt})$$

здесь  $Y\_OFFSET$  - стационарное значение;

$KP$  – коэффициент передачи;

$TN$  – постоянная интегрирования;

$TV$  – постоянная дифференцирования;

$e(t)$  – сигнал рассогласования ( $SET\_POINT - ACTUAL$ );

$ACTUAL$  – Текущее значение переменной;

$SET\_POINT$  – Задание;

$Y\_MIN, Y\_MAX$  - Значение выхода  $Y$  ограничено  $Y\_MIN$  и  $Y\_MAX$ .

Объявленные необходимые переменные в соответствии с входами и выходами функционального блоков. Представлено ниже.

Для того чтобы программа работала верно, необходимо для нее определить переменные и типы передаваемых данных для переменных:

```
VAR_GLOBAL c:ARRAY[1..60] OF REAL; q2:REAL; u1:REAL; g3:REAL;
g6:REAL; g7:REAL; u3:REAL; i: INT; T: REAL; u2: REAL; g4: REAL; g5: REAL;
g31:REAL; END_VAR
```



### 3.4 Результаты исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием

Данными результатами важно отметить и подтвердить проблему регулирования системы с транспортным запаздыванием, увидеть влияние запаздывания на устойчивость и оценить качество регулирования, а также проследить исключение влияния на устойчивость использованием предиктора Смита.

Для оценки практического влияния запаздывания на устойчивость системы исключим это запаздывание из структуры объекта. Это означает, что из объекта (см. рисунок 2.1), который представляет собой ёмкость и незаполненный трубопровод (линия запаздывания) исключается незаполненный трубопровод. Вода насосом подаётся непосредственно в ёмкость.

Для настройки регулятора для объекта, передаточной функцией которого является простое апериодическое звено первого порядка, можно было бы воспользоваться любым известным способом настройки, например, Циглера – Никольса. Но этот метод ориентирован на определённую модель объекта, в котором настройки ПИД - регулятора во многом зависят от запаздывания. Поэтому воспользуемся другим широко распространённым методом, основанным на интуиции и опыте исследователя, методе простого перебора.

На рисунке 3.6 представлен апериодический переходный процесс, без перерегулирования, который получен в результате длительного исследования объекта. Коэффициенты регулятора при этом равны:

$$K_p = 50;$$

$$K_i = 25;$$

$$K_d = 1.$$

В связи с тем, что процесс достаточно монотонный, исследованию влияния дифференциальной составляющей регулятора уделялось незначительное внимание.

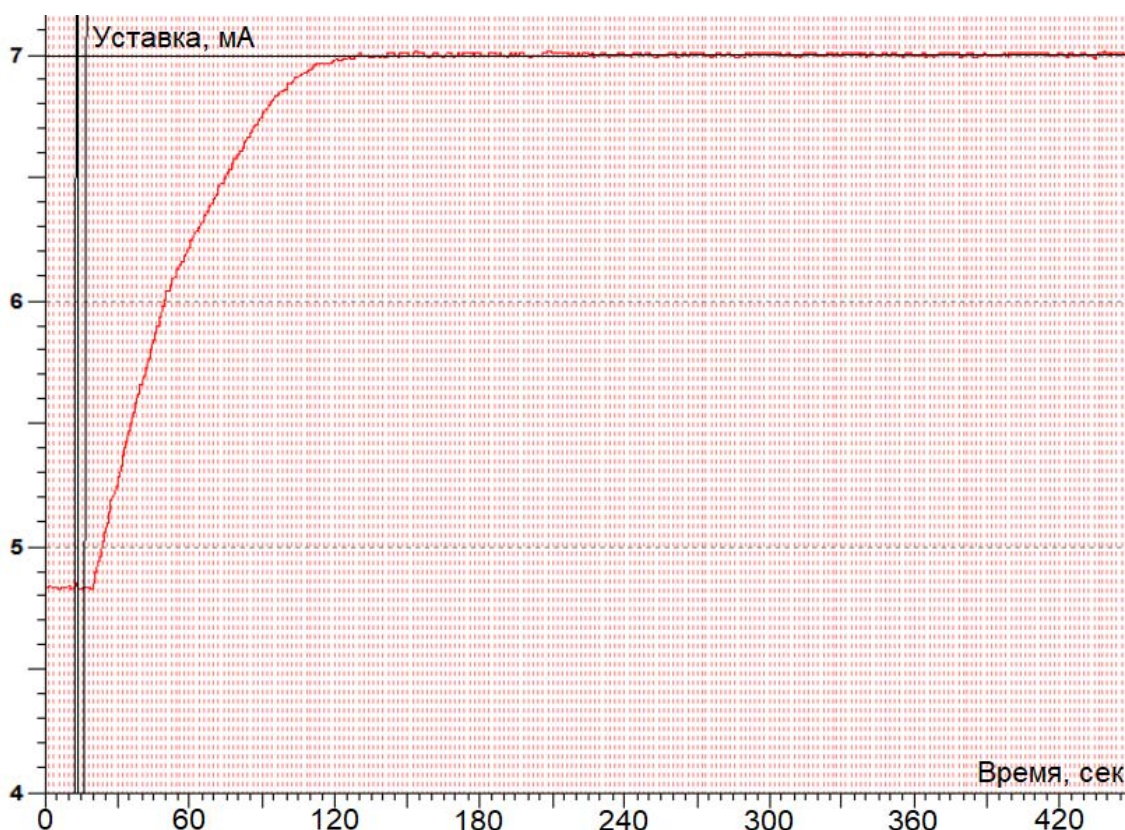


Рисунок 3.6 – Переходной процесс в системе без запаздывания  
( $K_p = 50$ ;  $K_i = 25$ ;  $K_d = 1$ )

По переходному процессу можно оценить показатели качества, такие как, перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ . Как было отмечено ранее перерегулирование это значение величины первого выбега переходного процесса относительно уставки, а время регулирования – время, после которого выходная величина не выходит за пределы 5-процентной зоны (процесс установился).

Для переходного процесса, представленного на рисунке 3.6 показатели качества следующие:

$$\sigma = 0; t_p = 130 \text{ сек.}$$

Следующим этапом будет исследование объекта с запаздывание. Для этого в объект вернём незаполненный трубопровод. Идентификация такого объекта проведена в п. 3.1. Передаточная функция такого объекта представляет собой аperiодическое звено первого порядка с чистым запаздыванием.

На рисунке 3.7 представлен переходный процесс, который наблюдается в замкнутой системе с ПИД - регулятором. Причем настройки ПИД – регулятора взяты из предыдущего пункта.

Основные выводы, которые можно сделать по кривой переходного процесса следующие:

- введение запаздывания отрицательно сказывается на устойчивости (переходный процесс колебательный, затухающий);

$$\sigma = 25\%;$$

$$t_p = 700 \text{ сек.}$$

Другими словами, произошло значительно ухудшение процесса регулирования.

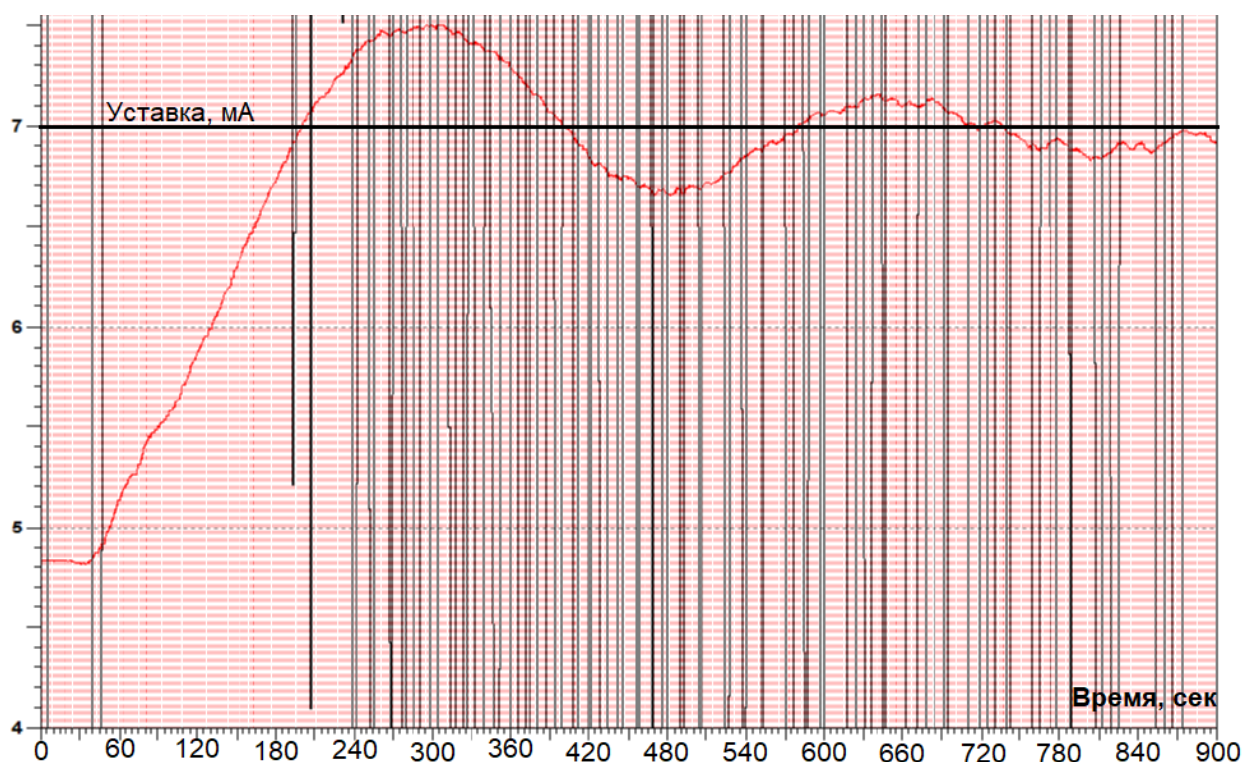


Рисунок 3.7 – Переходной процесс в системе с запаздыванием.

Регулирование с помощью ПИД – регулятора

$$(K_p = 50; K_i = 25; K_d = 1)$$

В случае, если использовать для настройки ПИД – регулятора метод Циглера – Никольса, результат (рисунок 3.8) получается ещё хуже. Огромное время



затухания и перерегулирование больше 50%. Однако, этот результат не удивителен, так как этот метод не даёт оптимальных решений.

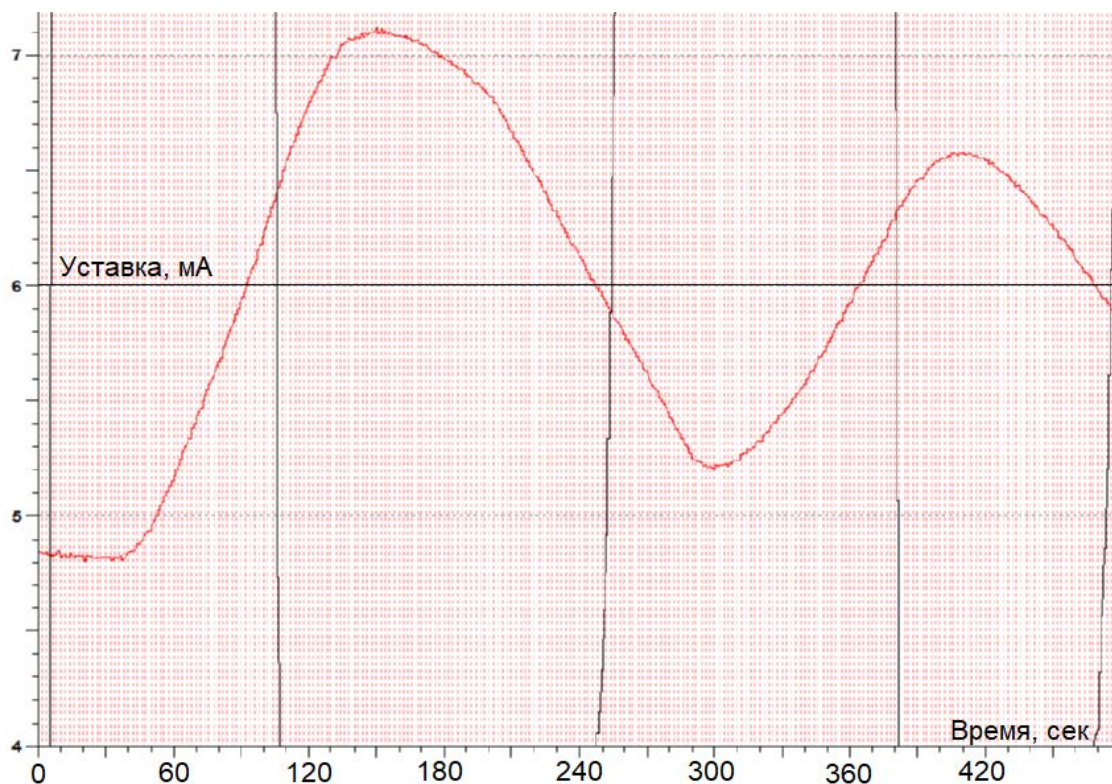


Рисунок 3.8 – Переходной процесс в системе с запаздыванием.

Регулирование с помощью ПИД – регулятора,  
настроенного методом Циглера - Никольса

Рассмотрим систему регулирования с предиктором Смита, алгоритм этого метода детально рассмотрен в п. 3.2 настоящей работы. Основная идея метода заключается в сохранении запаса устойчивости замкнутой системы при равенстве передаточных функций реального объекта и его модели. Чтобы реализовать подобный предиктор на практике необходимо большое количество испытаний именно в настройке модели объекта.

На рисунке 3.9 представлен переходный процесс в замкнутой системе с предиктором Смита. Настройка коэффициентов ПИД – регулятора аналогично той что получена в первом эксперименте без запаздывания.

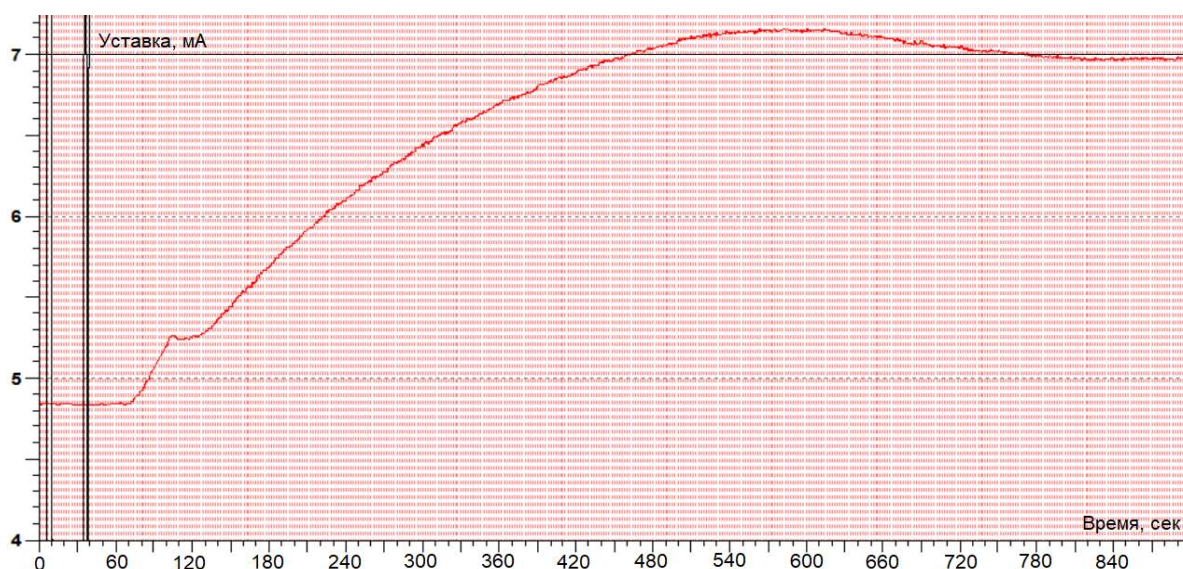


Рисунок 3.9 – Переходной процесс а замкнутой системе с предиктором Смита (настройки коэффициентов ПИД - регулятора:  $K_p = 50$ ;  $K_i = 25$ ;  $K_d = 1$ )

Основные выводы которые можно сделать на основании кривой переходного процесса:

- переходный процесс сохранил свою монотонность (апериодичность), но при этом появилось небольшое (не более 10 %) перерегулирование;
- время регулирования возросло до 420 сек.

Основной и достаточно значимый вывод заключается в том, что предиктор Смита практически компенсировал ухудшение устойчивости замкнутой системы, связанное с запаздыванием в объекте управления.

Далее, вышепредставленные результаты экспериментов сведены в таблицу 3.2 для наглядности сравнения.

Таблица 3.2 – Сравнение методов регулирования объекта с запаздыванием

Тип системы	Параметры настройки		Показатели качества	
			$\sigma$ , %	$t_p$ , сек
Замкнутая система с ПИД – регулятором для объекта без запаздывания	Кп	50	0	150
	Ки	25		
	Кд	1		
Замкнутая система с ПИД – регулятором для объекта с запаздывания	к	50	25	>700
	T <sub>и</sub>	10		
	T <sub>д</sub>	1		
Замкнутая система с ПИД – регулятором для объекта с запаздывания (регулятор настроен методом Циглера – Никольса)	к	2,5	~50	$\infty$
	T <sub>и</sub>	0,5		
	T <sub>д</sub>	0,1		
Замкнутая система с предиктором Смирта	к	50	~8	420
	T <sub>и</sub>	25		
	T <sub>д</sub>	1		

### 3.5 Выводы

После проведенного изучения теоретических выкладок и исходя из проведенного анализа теоретических сведений о системах с транспортным запаздыванием, можно утверждать о том, что запаздывание влияет на устойчивость системы и как следствие на качество регулирования.

В результате исполнения ВКР были выполнены работы как теоретической, так и практической направленности. Полученные в ходе экспериментальных

исследований результаты полностью подтвердили теоретические выводы о влиянии запаздывания на устойчивость замкнутых систем.

В процессе выполнения работы проведён сравнительный анализ алгоритмов регулирования:

- классического ПИД регулятора;
- предиктора Смита.

Отмечено, что и первом и втором случаях результаты далеки от идеальных. Но если с ПИД регулятором ресурс практически исчерпан, то в случае с предиктором Смита есть большое поле для совершенствования модели, которая является одним из основных источников посредственного регулирования.

Но даже из полученных результатов можно сделать однозначный вывод в пользу предиктора Смита, позволяющий при соответствующей настройке модели объекта исключить влияние запаздывания на устойчивость объекта регулирования.

Представить себе промышленное производство без средств автоматических систем тяжело. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что средства автоматизированных систем с запаздыванием актуален.

Актуальность обуславливается рядом причин. Например тем, что есть технологические процессы обладающие запаздыванием. Запаздывание, являющееся результатом движения какого-либо продукта по длинным конвейерным линиям или трубопроводам, называется транспортным запаздыванием. Например, движение вещества с определенной скоростью в системе, без каких-либо изменений его свойств. Кроме того, запаздывание может быть и в системах регулирования, где приборы действуют не постоянно. Расчет подобных систем имеет множество особенностей и специфик. Эти системы автоматического управления объектов с запаздыванием являются динамическими. Существуют также объекты, которые обладают скрытым запаздыванием, которое слабо влияет на их быстродействие, и очень часто им пренебрегают. При производстве, исследовании, проектировании и расчете, очень часто бывают ситуации, в которых нельзя пренебрегать транспортным запаздыванием в объекте – в его динамике, если взять частный случай, то необходимо учитывать запаздывание при управлении посредством вычислительными машинами, передачи информации и масштабных вычислений для управления в реальном времени. В подавляющем большинстве случаев, запаздывание является негативным фактором в системе, в результате чего возникают трудности с устойчивостью и качеством управления, однако обратное положение дел тоже возможно, так как запаздывание может носить положительных характер в системе.



#### 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

В настоящей работе исследуется влияние запаздывания на устойчивость объектов с большим транспортным запаздыванием. На сегодняшний день существует множество предприятий со всего мира, на которых есть технологические процессы с запаздыванием, что объясняет потребность на мировом рынке в более продвинутых системах управления объектами с большим транспортным запаздыванием.

##### 4.1.1 Потенциальные потребители

Конечные потребители более совершенных систем управления технологическими процессами с запаздыванием, любые предприятия, на которых есть какая-либо конвейерная линия или продуктопроводы. Существует множество таких промышленности, как в России, так и за рубежом Например: транспортировка нефти или газа, конвейерные линии производства автомобилей.

##### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Данный анализ проводится с благодаря оценочной таблице сравнения конкурентных технических решений:

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		ПИД регулятор	Регулятор Смиа	ПИД регулятор	Регулятор Смиа
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
Повышение производительности	0,13	5	4	0,6	0,5
Помехоустойчивость	0,08	5	5	0,7	0,3
Энергоэкономичность	0,06	4	4	0,5	0,6
Надежность	0,13	5	4	0,8	0,6
Потребность в ресурсах памяти	0,05	3	2	0,4	0,4
Функциональная мощность	0,08	5	3	0,7	0,4
Простота эксплуатации	0,09	5	4	0,6	0,5
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1. Конкурентоспособность технологии	0,09	5	4	0,8	0,7
2. Уровень проникновения на рынок	0,08	6	3	0,8	0,6
3. Цена реализации	0,07	3	3	0,2	0,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	0,4	0,4
5. Финансирование разработки	0,06	4	4	0,2	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>			<b>6,7</b>	<b>5,4</b>

Таким образом, конкурентоспособность разработки системы с ПИД-регулятором составила 6,7, в то время как у предполагаемого конкурента 5,4. Результаты показывают, что оба регулятора являются конкурентоспособными.

## 4.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>S1. Наличие опытного руководителя</p> <p>S2. Экологичность технологии.</p> <p>S3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>S4. Актуальность исследования</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>W1. Сложность проведения исследований.</p> <p>W2. Большой срок поставок оборудования для реализации данных технологий.</p> <p>W3. Проблемы с материально-техническим обеспечением лаборатории.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>O1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>O2. Большой потенциал применения данной разработки</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на новую разработку в связи с обращением с предприятиями с большими транспортными запаздываниями</p> <p>O4. Использовать инфраструктуру коллег из университетов дальнего зарубежья.</p>	<p>O1O4S1S4 Возможность дальнейшего исследования в рамках аспирантуры</p> <p>O2S2 Возможность применения технологии на предприятиях негативно влияющих на экологию</p> <p>O3S3 Экономический интерес предприятий в реализации данной технологии</p>	<p>O1O4W1 Благодаря инфраструктуре ТПУ и университетов других стран исследование данной темы проходит более продуктивно</p> <p>O2O3W3W2 Потенциал и интерес предприятий с технологическими процессами с запаздываниями обуславливает возможности и важности реализации новых технологий</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>T1. Развитая конкуренция технологий АСУТП, мехатроники и робототехники</p> <p>T2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p> <p>T3. Введения дополнительных государственных требований к АСУТП, мехатроники и робототехники</p>	<p>T1S4 Продвижение новой технологии с целью появления спроса путем написания статей в иностранные журналы</p> <p>T3S2 Использование побочных и сопотствующих технологий</p>	<p>T1W3 Отсутствие спроса на новые технологии, могут ограничить поступление финансовых средств</p> <p>T1W3W1 Данные результаты НИР можно дополнить, что дает большое пространство для дальнейших исследований.</p>

Таблица 4.3 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4
O1	+	-	-	-
O2	-	+	-	-
O3	-	-	+	-
O4	-	-	-	+

Таблица 4.4 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W 3
O1	+	-	-
O2	-	+	-
O3	-	-	+
O4	+	-	-

Таблица 4.5 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4
T1	-	-	-	+
T2	-	-	-	-
T3	-	+	-	-

Таблица 4.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W 3
T1	+	-	+
T2	-	-	-
T3	-	-	-

#### 4.3 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке: определение структуры работ в рамках научного исследования; определение участников каждой работы; установление продолжительности работ; построение графика проведения научных исследований. Распределение этапов и работ представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление технического задания	Руководитель
	2	Выбор направления исследований	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Составление литературного обзора	И
	4	Построение модели эксперимента	И
	5	Проведение практической части	И
Обобщение и оценка результатов	6	Анализ и обработка результатов	Руководитель, И
	7	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель, И
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	И
	9	Подготовка к защите ВКР	И

#### 4.4 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{\text{ож}i}$  используется следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5}$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\text{мин}i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожи}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожи}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.5 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 4.4).

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1,48.$$

Пример расчета длительности календарных работ:

$$1) t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8; T_{pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8; T_{ki} = 2,8 \cdot 1,49 = 4,2 \approx 4 \text{ дн.}$$

Временные показатели проведения научного исследования представлены Приложении А.

Таким образом, суммарная длительность работ в рабочих днях ( $T_{pi}$ ) для руководителя составила 7,6 дней, для студента – 43,8 дней. Длительность работ в календарных днях ( $T_{ki}$ ): для руководителя – 11 дней, для студента – 64,2 дней.

Таблица 4.8 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ							
				февр		март		апр		май	
				1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	4	■							
2	Выбор направления исследований	Руководитель	5	■							
3	Составление литературного обзора	студент	37,7								
4	Построение модели эксперимента	студент	2,8								
5.	Проведение практической части	Студент	9,7								
6.	Анализ и обработка результатов	Руководитель, студент	1						■		
7.	Обсуждение и оценка эффективности и результатов	Руководитель, студент	1						■		
8.	Составление пояснительной записки	студент	3								
9.	Подготовка к защите ВКР	студент	9								

□ - студент ■ - руководитель

#### 4.6 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям: материальные затраты НТИ; затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ; основная заработная плата исполнителей темы; дополнительная заработная плата исполнителей темы; отчисления во внебюджетные фонды (страховые



отчисления); затраты научные и производственные командировки; контрагентные расходы; накладные расходы.

#### 4.7 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. Все материальные затраты, участвующие в научном исследовании представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
канцелярия	шт	1	300	300
вода	л	10	50	500
Контроллер Овен ПЛК150 220 АМ	шт	1	15600	15600
Уровнемер Овен ПДУ-И	шт	3	29900	89700
Клапан регулирующей MV54	шт	1	164000	164000
Итого				<b>270100</b>

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $C_{\text{мат}} = 270100 * 1,05 = 283605$  руб.

#### 4.8 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального программного обеспечения, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Расчет затрат по данной статье представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Затраты на специальное оборудование

№ п/ п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1.	Matlab	1	8130	8130
2.	Microsoft Office	1	9353	9353
3.	Codesys	1	32000	32000
Итого:				19794,2

\*Доля стоимости вышеперечисленного ПО, расходуемая во время ВКР составляет 40%.

#### 4.9 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Используется формула

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{pf} * n}{F_D},$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;  $C_{OB}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;  $F_D$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году.

Рассчитаем амортизационные отчисления для ноутбука (время использования = 352 ч) и контроллера (80 часов), уровнемера (80 часов) и клапана (40 ч).

$$C_{AM_{ноут.}} = \frac{0,4 \cdot 35000 \cdot 352 \cdot 1}{2384} = 2067,1$$

$$C_{AM_{контр.}} = \frac{0,6 \cdot 15600 \cdot 80 \cdot 1}{2384} = 314$$

$$C_{AM.уровн.} = \frac{0,6 \cdot 29900 \cdot 80 \cdot 3}{2384} = 1806$$

$$C_{AM.клап.} = \frac{0,5 \cdot 164000 \cdot 40 \cdot 1}{2384} = 1375,8$$

Итого амортизация = 5562,9 рублей.

#### 4.10 Заработная плата исполнителей темы

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{дн-т}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = МО/25,083$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Таблица 4.11 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1342,09	8	1,699	18241,7
И	15 470	616,75	44	1,699	46105,8
Итого:					64347,5

Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{ПР} = 1,1$ ;  $K_{доп.ЗП} = 1,188$ ;  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{и} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$ . Вышеуказанное значение  $K_{доп.ЗП}$  применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае  $K_{и} = 1,62$ .

#### 4.11 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

При этом сумма взносов к уплате зависит от того, превысил доход установленный лимит или нет.

Ставка 30% действует по 2020 год включительно (ст. 425, 426 НК РФ). (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель проекта	18241,7	5472,5
Исполнитель	46105,8	13831,7
Итого		19304,2

#### 4.12 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов (таблица 4.10).

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}}$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 10% от всех предыдущих статей.

$$З_{\text{накл}} = 39261,4 \text{ руб.}$$

#### 4.13 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на исследование по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	283605
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	19794,2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	64347,5
4. Амортизационные отчисления	5562,9
5. Отчисления во внебюджетные фонды	19304,2
6. Накладные расходы	39261,4
7. Бюджет затрат НТИ	431875,2

#### 4.14 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат двух вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Исследование студентом и преподавателем (431875,2 руб).
2. Исследование компанией SCADTech (1000000руб).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{431875,2}{1000000} = 0,43;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{1000000}{1000000} = 1;$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности.

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки 1	Бальная оценка разработки 2
Повышение производительности	0,25	5	5
Помехоустойчивость	0,15	5	5
Энергоэкономичность	0,15	4	4
Надежность	0,15	5	4
Потребность в ресурсах памяти	0,1	4	5
Функциональная мощность	0,15	5	4
Итого:	1	4,75	4,5

$$I_{p-uch1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 = 4,75;$$

$$I_{p-uch2} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 = 4,5.$$

#### 4.15 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент»

Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 431875,2 рублей.

Выявлен интегральный показатель эффективности, который говорит о том, что выгоднее проводить исследование студентом с преподавателем.

В ходе оценки двух типов систем с различными регуляторами прослеживается очевидная конкурентоспособность обоих регуляторов,

конкурентоспособность разработки системы с ПИД регулятором составила 6,7, в то время как у предполагаемого конкурента 5,4.



## 5 Социальная ответственность

### 5.1 Аннотация выпускной квалификационной работы по разделу социальная ответственность

Настоящая работа заключается в исследовании влияния запаздывания на устойчивость объектов с большим транспортным запаздыванием.

Работа проходит в лаборатории десятого корпуса Томского политехнического университета, где имеются стенд с объектом управления: контроллер; основная и вспомогательная ёмкости с водой; датчик уровня жидкости; линия запаздывания; ручной вентиль; регулятор уровня жидкости; привод насоса; насос. Вся работа происходит непосредственно за компьютером, с которого осуществляется настройка контроллера и обработка информации полученной в процессе исследования.

В настоящей работе совершенствуются алгоритмы и исследуются регуляторы для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием.

В данном разделе выпускной квалификационной работы необходимо провести анализ всех вредных и опасных факторов на рабочем месте в соответствии с действующими нормативными документами.

### 5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочая зона лаборатории включает в себя стенд с объектом управления: основная емкость; вспомогательная ёмкость; датчик уровня; линия запаздывания; ручной вентиль; регулятор уровня; привод насоса; насос. В настоящей работе совершенствуются алгоритмы и исследуются регуляторы для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием.

Рабочее место включает в себя стол, компьютер. Лаборатория автоматизации находится в НИ ТПУ.

Для студента-магистранта необходимо указать особенности трудового законодательства, а именно режим рабочего времени и защита персональных данных работника.

Согласно ТК РФ, 197 -ФЗ каждый работник имеет право:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя и т.д.

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество; рабочий стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте; рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.

В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен.

В соответствии с СН-181-70 рекомендуются следующие цвета окраски помещений: потолок - белый или светлый цветной; стены - сплошные, светло-голубые; пол - темно-серый, темно-красный или коричневый. Применение

указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшением зрительного утомления.

По ГОСТ 12.4.026-76\* производственное оборудование должно соответствовать требованиям технической эстетики. Цвета сигнальные и знаки безопасности.

Согласно ТК РФ Статье 91 «Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю».

ТК РФ Статья 94. «Продолжительность ежедневной работы» для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, где установлена сокращенная продолжительность рабочего времени, максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать: при 36-часовой рабочей неделе - 8 часов. Это относится к времени работы в лаборатории с химически вредными веществами. В случае данной магистерской работы - риск отрицательного воздействия щелочных электролитов на организм.

По ТК РФ Работнику в течение рабочего дня предоставляется перерыв не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с посменного согласия работника.

### 5.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

В данном разделе рассмотрим основные требования по эргономике рабочего места при выполнении работ сидя. Данные требования регламентируются ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». В ГОСТе указаны такие параметры, как высота сидения, ширина пространства для ног, высота рабочей поверхности для человека, выполняющего работы в сидячем положении.

Рабочее место - это зона пространства, оснащена необходимым оборудованием, где происходит трудовая деятельность одного работника или группы работников.

При проектировании рабочего места необходимо исходить из конкретного анализа трудового процесса человека на данном оборудовании и учитывать антропометрические данные, физиологические и психологические характеристики трудового процесса, санитарно-гигиенические условия работы. В таблице 5.1 представлены значения для оптимальной высоты рабочего стола исходя из категории выполняемых работ.

Таблица 5.1 - Высота рабочей поверхности стола рабочего места, мм

Категория работы	Высота рабочей поверхности для рабочего места		
	женщин	мужчин	женщин и мужчин
Легкая	900	1060	1025
Средняя	930	980	955
Тяжелая	870	920	895

Независимо от профессионального назначения есть общие требования для сидений длительного пользования:

1. Сиденье должно обеспечивать позу, способствующую уменьшению статической работы мышц.
2. Сиденье в целом и его элементы должны создавать условия для возможности изменения рабочей позы
3. Наличие ряда регулируемых параметров (высота сиденья, угол наклона спинки, высота спинки) [48].

Расстояние от глаз пользователя до экрана монитора должно быть не менее 50 сантиметров, оптимально – 60–70 сантиметров. Расстояние от экрана монитора до задней стенки монитора соседнего ряда должно быть не менее 2 метров, а расстояние между боковыми стенками – не менее 1,2 метров.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека. К микроклиматическим показателям относятся температура, влажность и скорость движения воздуха, температура поверхностей ограждающих конструкций, предметов, оборудования, а также некоторые их производные.

В таблице 5.2 представлены оптимальные и допустимые значения температуры, влажности и скорости движения воздуха согласно ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ, Вт	Параметр микроклимата	Оптимальная величина	Допустимая величина
Холодный	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-23°C 40 – 60% 0,1м/с	15-28°C 20 – 80% Не более 0,2 м/с
Теплый	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	22-24°C 40-60% 0,2 м/с	21-28°C 20 – 80% 0,1-0,5 м/с

Оптимальный уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65дБА. Максимальный допустимый уровень звука

постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. Фактический уровень шума в лаборатории составляет 60 дБА.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работника, повышает безопасность труда и снижает травматизм. Согласно СНиП II-4-79, в помещениях вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения. Согласно в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы [48].

#### 5.4 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Перечень опасных и вредных факторов, соответствующий ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» характерных для проектируемой данной производственной среды представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этап работы		Нормативные документы
	Разраб.	Изгот.	
1. Электромагнитное излучение	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
2. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	ГОСТ 12.1.019 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования» ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значений напряжений прикосновения и токов. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
3. Превышение уровня шума		+	ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум.

## 5.5 Электромагнитное излучение

Основным вредным фактором для студента является электромагнитное излучение. В таблице 5.4 приведены временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей.

Таблица 5.4 – Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электрического поля		15 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами. Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1. Продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч. Предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата.

2. Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми



стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии  $60 \div 70$  см, но не ближе 50 см.

3. Для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения от монитора ПК рекомендуется использовать защитные экраны из металлической сетки и металлических прутков в виде навесов и допустимая величина защитного сопротивления заземления экранирующих устройств не должна быть более 4 Ом.

## 5.6 Электробезопасность

В работе с установками или средствами, требующими питания от электрической сети, очень важным фактором является **электробезопасность**. В производственных процессах настоящей работы используются два рода тока – постоянный и переменный. Они оказывают различное воздействие на организм при напряжениях до 500 В. Наибольшую опасность представляет переменный ток частотой 50 Гц, которая является стандартной для отечественных электрических сетей.

Все производственные электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности); до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью); свыше 1000 В (помещения особо опасные).

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые напряжения и токи, протекающие через тело человека. При неаварийном режиме работы электроустановок постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц. Для переменного тока 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а сила тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц – соответственно, 2 В и 0,4 мА; для постоянного тока – 8 В и 1,0 мА (не более 10 минут в сутки). При этом безопасные номинальные значения составляют:  $U < 36$  В,  $I < 0.1$  А,  $R_{\text{зазем}} < 4$  Ом.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства: защитные

оболочки; защитные ограждения (временные или стационарные); защитные барьеры.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы: защитное заземление (преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением); зануление (преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением); применение безопасного разделительного трансформатора (предназначен для питания цепей сверхнизким напряжением); малое напряжение; защитное отключение (Быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током).

Средства индивидуальной защиты подразделяются на изолирующие, вспомогательные и ограждающие. К основным изолирующим средствам в работе с электроустановками до 1000 В относят диэлектрические перчатки, инструмент с изолированными ручками. К дополнительным – диэлектрические галоши, коврики, диэлектрические подставки.

## 5.7 Превышение уровня шума

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются компьютер, вентиляторы системы охлаждения, объект управления. Оптимальный уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65дБА. Максимальный допустимый уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. Фактический уровень шума в лаборатории составляет 60 дБА. Для

снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ). СКЗ: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны. В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон [56].

## 5.8 Искусственное освещение

Рабочим местом является лаборатория с компьютерами, где проводится исследования, поэтому разрядом рассматриваемой зрительной работы будет А-2 в соответствии со СНиП 23-05-95.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в офисных помещениях для использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол, оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Согласно ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест средняя освещенность на рабочих местах с постоянным пребыванием людей должна быть не менее 300 лк. В лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк [56]. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы.

Равномерность освещенности должна быть не менее 0,40 для зоны непосредственного окружения; 0,10 - для зоны периферии.

При проектировании системы освещения для исключения или снижения уровня отраженной блескости необходимо обеспечивать правильное взаимное расположение светильников и рабочей поверхности, ограничение яркости и/или увеличение светящей части поверхности светильников, учитывать коэффициенты отражения материалов отделки потолка и стен.

Коэффициенты отражения окружающих поверхностей должны быть:

- от 0,7 до 0,9 - для потолков;
- от 0,5 до 0,8 - для стен;
- от 0,2 до 0,7 - для рабочих поверхностей;
- от 0,2 до 0,4 - для пола.

Лаборатория основ автоматики, находящаяся в НИ ТПУ в 10 корпусе (к.025) (рис.5.1) для которой производится расчет, представленный ниже, представляет собой помещение квадратной формы, шириной  $A=4,5$  м; длиной  $B=7$  м. В лаборатории располагаются 8 рабочих зон с лабораторными стендами (включают себя микроконтроллеры, системы автоматического управления) и персональными компьютерами (ЭВМ). В лаборатории есть только одно окно с приблизительными размерам 70х50 см, поэтому очень важно сделать правильный расчет и подобрать лампы с требуемыми характеристиками, для соответствия системы освещения в рабочей аудитории нормам СНиП 23-05-95.

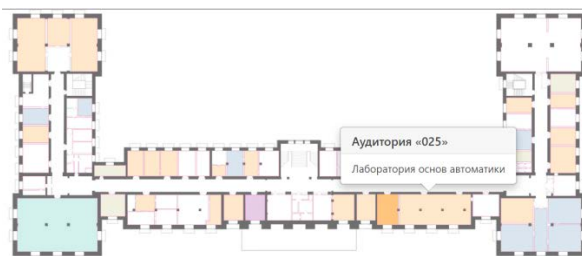


Рисунок 5.1 – Изображение цокольного этажа и расположение аудитории 025 в корпусе №10 НИ ТПУ

Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. В лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса с помощью персональных компьютеров и лабораторных стендов с микроконтроллерами и системами автоматики освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 Лк.

Наиболее распространёнными типами светильников для люминесцентных ламп являются: Открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО, ООД – для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости.

Выбираем лампу дневного света ЛБ-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2800 \text{ Лм}$  [48]. Подобраны светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Данный светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Рассчитаем площадь лаборатории:

$$S = 7 \cdot 4,5 = 31,5 \text{ м}^2$$

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , уменьшение которой удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. В нашем случае для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне  $\lambda = 1,1 - 1,3$  [49]. Принимаем  $\lambda = 1,1$ .

Размещение светильников в помещении определяется следующими параметрами, м:  $H$  – высота помещения;  $h_c$  – расстояние светильников от перекрытия (свес);  $h_n = H - h_c$  – высота светильника над полом, высота подвеса;  $h_{рп}$  – высота рабочей поверхности над полом;  $h = h_n - h_{рп}$  – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью.

Высота потолков в лаборатории основ автоматизации (к.025)  $H = 3,5 \text{ м}$ ; расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,155 \text{ м}$ . Наименьшая

допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  
 $h_n = 3,5$  м; высота рабочей поверхности над полом  $h_{rp} = 0,8$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется [49]:

$$h = 3,5 - 0,8 - 0,158 = 2,54 \text{ м.}$$

При равномерном размещении люминесцентных светильников последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования [49].

Теоретическое расстояние между соседними светильниками или рядами определено по формуле:  $L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,58 = 2,79$  м

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4,5}{2,79} = 1,61 \approx 2,$$

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{7}{2,79} = 2,51 \approx 3,$$

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 3 = 6,$$

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,79}{3} = 0,93 \approx 0,93 \text{ м}$$

где  $Nb$  – число рядов светильников в помещении;  $Na$  – число светильников в ряду;  $N$  – общее число светильников,  $l$  – расстояние от крайних светильников или рядов до стены (его принимают  $l=L/3$ ).

Расчет общего равномерного освещения.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток лампы определяется по формуле [49]:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta}$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк;  $S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;  $K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли;  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{cp}/E_{min}$ . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;  $N$  – число ламп в помещении;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока [49].

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$ . Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)}$$

$$i = \frac{31,5}{2,79 \cdot (4,5 + 7)} = 0,98$$

Значения коэффициентов отражения стен  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$  из [49] принимаем равными 50 % и 30 % (50 % - поскольку поверхность потолка имеет цвет чистый бетонный, поверхность стен также бетонная с окнами).

Исходя из данных коэффициентов отражения стен и потолка и индекса помещения, принимаем, что коэффициент использования светового потока светильников с люминесцентными лампами  $\eta = 44 \%$  [49].

Коэффициент запаса  $K_z$  [48] принимаем равным 1,5 (для помещения с малым выделением пыли).

Следовательно, определяем потребный световой поток люминесцентных ламп:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 4,5 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,44} = 2953 \text{ лм}$$

$N$  – число ламп (у нас в каждом светильнике 2 лампы, 12 ламп).

Таким образом, размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду еще по три светильника типа ОДО мощностью 40 Вт с длиной 1227 мм и шириной 265 мм. На рисунке 5.2 изображен план (схематичное изображение) помещения лаборатории основ автоматики и размещения светильников с люминесцентными лампами.

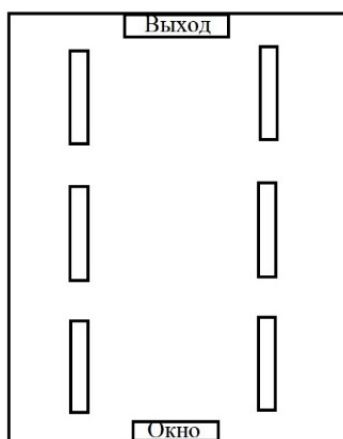


Рисунок 5.2 – Схема расположения ламп с аудитории 025 лаборатории основ автоматики НИ ТПУ

Теперь необходимо выполнить проверку. Из [49] выбираем стандартную люминесцентную лампу – ЛБ 40 Вт с потоком 2800 лм.

Делаем проверку выполнения условия.

$$- 10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лб}} - \Phi}{\Phi_{\text{лб}}} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2800 - 2953}{2800} \cdot 100\% = -5,4 \%$$

Следовательно, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона, то есть система освещения в рабочей аудитории №025 соответствует нормам СНиП 23-05-95.

## 5.9 Нервно-психические перегрузки

Среди причин, ведущих к тяжелым заболеваниям, нужно указать на нервные перегрузки, отрицательные психологические раздражители. Перегрузки возникают при неравномерном распределении времени при работе и отдыхе. Это приводит к утомлению, что является реакцией организма на физические и нервно-психические перегрузки. Вследствие накопления усталости постепенно развивается переутомление, что относится к состоянию предболезни. Если не принять мер по снижению нагрузок, то последствия выразятся в развитии



профессионального или производственно-обусловленного заболевания в связи со снижением сопротивляемости организма.

#### 5.10 Перенапряжение зрительных анализаторов

При работе за ПК оператор читает текст в прямом свете, его глаза смотрят на источник света.

При работе за дисплеем возникает следующая проблема: экран имеет высокую фоновую яркость, при ее понижении уменьшается контрастность изображения, что создает проблему для считывания информации. Поэтому пользователю приходится повышать яркость, что приводит к увеличению интенсивности вредных излучений и к утомлению глаз.

В настоящее время при работе за ПК визуальные параметры мониторов оказывают большую нагрузку на зрительные анализаторы, а именно на мышцы глаз. В результате чего мозгу сложно идентифицировать изображение.

В связи с этим параметры безопасности компьютерной техники указаны в соответствующих нормативных документах.

После длительной нагрузки необходим период восстановления и отдыха. Если полного восстановления возможностей зрительного аппарата не происходит, то в детском и юношеском возрасте зрительная усталость приводит к нарушениям в аккомодационном механизме глаза, а в дальнейшем – к близорукости. В зрелом возрасте создаются предпосылки к развитию хронических глазных заболеваний [51].

#### 5.11 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия исследования на окружающую среду. Необходимо последовательно рассмотреть, как исследование влияет на атмосферу, гидросферу и литосферу и предложить решения по обеспечению экологической безопасности.

Персональный компьютер и объект управления являются основными источниками потребления электроэнергии. Это влечет за собой общий рост

объема потребляемой электроэнергии. Для удовлетворения потребности в электроэнергии, приходится увеличивать мощность и количество электростанций. Это приводит к нарушению экологической обстановки, так как электростанции в своей деятельности используют различные виды топлива, водные ресурсы, а также являются источником вредных выбросов в атмосферу.

#### 5.12 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Под чрезвычайной ситуацией понимается обстановка, сложившаяся в лаборатории в результате стихийного бедствия, техногенной аварии (катастрофы), которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде.

#### 5.13 Техногенная безопасность

При выполнении работ исследования с помощью объекта управления и компьютера могут возникнуть следующие виды опасности: поражение электрическим током; пожароопасность; взрывоопасность, поскольку все стенды с микроконтроллерами, персональные компьютеры имеют питание от электрической сети.

Основы пожарной безопасности определены по ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010. Пожарная опасность ПЭВМ, обусловлена наличием в применяемом электрооборудовании горючих изоляционных материалов.

По взрывопожарной и пожарной опасности все помещения подразделяются на категории А, Б, В1 – В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $B_n$ ,  $G_n$  и  $D_n$ . А – повышенная взрывопожароопасность; Б – взрывопожароопасность; В1 – В4 – пожароопасность; Г – умеренная пожароопасность; Д – пониженная пожароопасность. Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии. Используемое помещение относится к классу с умеренной пожароопасностью.

Согласно НПБ 105-03 лаборатории относятся к категории Г – негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации (план эвакуации показан на рисунке 5.3).

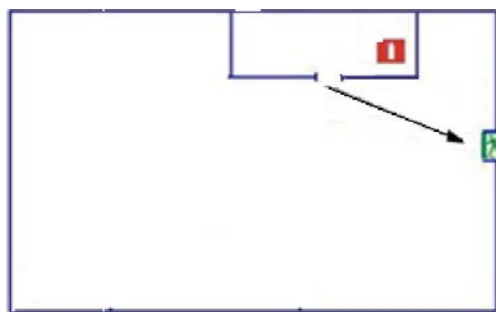


Рисунок 5.3 – План эвакуации из рабочего помещения

Источниками электроопасности могут быть неисправная электропроводка, открытые токоведущие части установки, доступные для соприкосновения, отсутствие заземления. В случаях возникновения аварий работающий должен немедленно сообщить о случившемся администрации цеха и принять экстренные меры по устранению аварийной ситуации.

При загорании электрооборудования следует отключить электропитание на силовом щите; сообщить администрации и в пожарную охрану; приступить к тушению загорания имеющимися первичными средствами пожаротушения в соответствии с инструкцией по пожарной безопасности. При угрозе жизни – покинуть помещение.

При несчастном случае оказать пострадавшему первую (доврачебную) помощь; сообщить о случившемся администрации, при необходимости вызвать «скорую помощь»; принять меры к сохранению обстановки, где произошел несчастный случай, до начала расследования, если это не создает опасности окружающим.

Также наиболее часто встречаются ситуации поражение электрического тока. Меры защиты от поражения представлены в п.2. При поражении работника электрическим током необходимо принять следующие меры:

1. Освободить пострадавшего от действия электрического тока и оценить состояние пострадавшего.

2. Вызвать скорую медицинскую помощь или врача, либо принять меры для транспортировки пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение.

3. Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под действием тока, ему до прибытия врача необходимо обеспечить полный покой и в дальнейшем медицинское наблюдение в течение 2-3 часов.

4. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимся дыханием, его следует ровно и удобно положить, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой, дать понюхать нашатырный спирт. Если пострадавший плохо дышит, необходимо сделать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца.

5. При отсутствии признаков жизни (отсутствие дыхания, пульса, реакции зрачка на свет) нельзя считать пострадавшего мертвым. Ему должна быть оказана первая медицинская помощь в виде искусственного дыхания и непрямой массаж сердца. Искусственное дыхание и непрямой массаж сердца следует делать непрерывно до прибытия врача; 6. переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или, когда оказание помощи на месте невозможно.

#### 5.14 Безопасность при природных чрезвычайных ситуациях

ЧС природного характера возникают при естественных природных явлениях, происходящих в окружающей среде, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [50].

Поскольку работы в лаборатории предполагает работу с высоким напряжением основными, наиболее распространенными чрезвычайными ситуациями являются остановки экспериментальных работ вследствие морозов; а также диверсии.

Меры по предупреждению чрезвычайных ситуаций при морозах:

1. Увеличить устойчивость системы электроснабжения. Необходимо заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

2. Оборудовать запасные автономные источники теплоснабжения, кольцевание системы, заглубление теплотрасс.

3. Обеспечить устойчивость систем водоснабжения.

4. Обеспечить устойчивость системы водоотведения. Создание резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Разработка схемы аварийного выпуска сточных вод непосредственно в водоемы. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, необходимо комплектовать надежными источниками электропитания.

5. Меры по предупреждению чрезвычайных ситуаций при диверсии:

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновении посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.

2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.

3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

#### 5.15 Анализ объекта исследования

Контроллеры и система автоматизированного управления, как и любая технологическая система, проходит следующие этапы: разработка, эксплуатация, утилизация. Как было выше отмечено, в процессе эксплуатации не происходит значительного воздействия на окружающую среду в отличие от последнего этапа. Необходимо утилизировать компоненты автоматики правильно, чтобы избежать загрязнений.

Процесс утилизации контроллера и прочих звеньев автоматизированной системы (датчики, исполнительные механизмы, уровнемеры) будет аналогичен процессу утилизации компьютерной техники.

Изначально необходимо составить акт списания. Если техника не подлежит ремонту и эксплуатации, это подтвердит технический осмотр и выведенное на основании его результатов экспертное заключение. Затем техника будет разобрана на мелкие компоненты. После происходит переработка. Она производится для того, чтобы полученные в ходе нее черные металлы и цветные металлы снова стали сырьем, как и пластик, прошедший перед этим сортировку по видам и по цветам. Утилизация вычислительной техники также имеет еще 1 особенность – в составе такой техники находится много драгоценных металлов. Поэтому по закону утилизацией оргтехники должна осуществляться компанией, имеющей сертификат Пробирной Палаты [52].

Утилизация электронного оборудования нужна, чтобы уберечь окружающую среду от загрязнений. Только таким образом можно избавиться от постоянно растущих свалок техники. А она может содержать такие материалы, как металлические детали и пластик, которые трудно поддаются процессу разложения. Некоторые элементы техники, в частности дополнительные системы питания, содержат опасные химические соединения. В связи с этим необходимо знать, что утилизация оборудования – это обязательная процедура.

Также нужно помнить, что за загрязнение окружающей среды полагаются штрафы. Они регламентируются федеральным законом об охране окружающей среды №7- ФЗ [53].

#### 5.16 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В соответствии с классификацией объект исследований может инициировать следующие виды чрезвычайных ситуаций. В процессе эксплуатации учебного стенда с объектом управления могут возникать аварии, которые приведут к воспламенению. Это может нанести вред как зданию, где находится оборудование и имущество, так и персоналу, который будет находиться в этом здании. Поэтому данный фактор можно отнести и к техносоциальным, и к техногенным ЧС.

Техносоциальные ЧС – это ЧС, источником возникновения которой служат техногенные причины, которые наносят ущерб социальной системе [54]. Техногенные ЧС – это ЧС, источником возникновения которых служит техногенное явление, которое наносит вред техногенному объекту [54].

В процессе исследований также можно исключить природные ЧС, так как исследования проводятся в лабораторных условиях, то есть в помещении. Возможные аварии являются могут быть не только связаны со скачком напряжения, например, но и с ошибкой при проектировании. Тогда ЧС будет социотехногенной, потому что причиной ЧС будет человек, а пострадает помещение, оборудование и т.д. Социотехногенными ЧС – это ЧС, причиной которых служит человек, его поведение, что оказывает воздействие на различные техногенные объекты [54].

## 5.17 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций нужно заблаговременно проводить мероприятия по их предупреждению. Эти мероприятия ведут к снижению возможности для возникновения ЧС и их масштабов. Эти мероприятия базируются на:

- прогнозировании угроз, опасности возникновения ЧС различного характера, в частности природного и техногенного, и возможных последствий воздействия на людей, материальные объекты и окружающую среду;
- мониторинге потенциально опасных объектов, окружающей среды, диагностике состояния сооружений и зданий [55].

Предварительные меры по уменьшению вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций делятся на такие направления:

- снижение разрастания опасных явлений до ЧС;
- снижение возможной частоты событий, которые могут стать ЧС.

Снижение частоты событий, инициирующих ЧС, необходимо предпринять следующие действия:

- бороться с терроризмом и преступностью;
- проводить профилактические работы по возникновению аварий (техническое обслуживание, планово-предупредительные ремонты, диагностика оборудования);
- осуществлять предупреждение опасных природных явлений;
- разбивать территории на районы, чтобы определить оптимальное расположение объектов, в том числе и потенциально опасных.

Также необходимо предпринять меры по снижению возможностей для того, чтобы опасное явление стало чрезвычайной ситуаций, такие как:

- обеспечить эффективность систем безопасности;
- обеспечить физическую устойчивость сооружений и зданий;
- уменьшить уровень уязвимостей объектов к воздействию негативных факторов опасных явлений природного и техногенного рода;



- обеспечить снижение уровня нагрузок и защищенности объектов;
- обеспечить защиту от экстремальных социальных явлений путем проведения инструктажей для персонала;
- создать инженерную защиту от опасных явлений [55].

#### 5.18 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В данном разделе были определены вредные и опасные факторы, формируемые при работе в исследовательской лаборатории, среди которых можно выделить повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенный уровень шума насосов, пожаровзрывоопасность. Описаны методики снижения воздействия вредных факторов, а также регламент действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, к которым могут привести опасные факторы.

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведён анализ существующих алгоритмов управления реальными объектами с большим запаздыванием.

Для управления объектом было предложено использование классического ПИД-регулятора и специального регулятора для объектов с запаздыванием - предиктора Смита.

Для настройки коэффициентов регулятора произведена идентификация объекта управления по кривой разгона. Передаточная функция объекта управления получена в виде апериодического звена первого порядка с чистым запаздыванием. Эта же модель использовалась для предиктора Смита.

Для сокращения количества экспериментов на реальном объекте было проведено моделирование замкнутых систем с ПИД-регулятором и предиктором Смита. В результате моделирования предиктор Смита показал лучшие качественные показатели, чем ПИД-регулятор.

Эксперименты на реальном объекте подтвердили результаты моделирования, но уже не так очевидно.

Оба способа могут быть использованы для управления подобными объектами и имеют резервы для повышения качества. Для настройки ПИД-регулятора может быть применён новый метод.

Предиктор Смита для управления объектом с запаздыванием может повысить качество с совершенствованием математической модели объекта управления. Работы в этом направлении будут продолжены.

## Список литературы

1. Красовский Н.Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959. – 211 с.;
2. Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, 1978. – 416 с.;
3. Жабко А. П., Харитонов В. Л. Методы линейной алгебры в задачах управления. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1993;
4. Kharitonov V.L. Time-Delay Systems. Lyapunov Functionals and Martices. Birkhäuser. – 2013. – 312 p.;
5. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.engineer-oht.ru/avtomatizaciya-tp/mechanicheskoe>;
6. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://metallurgist.pro/konstruktsiya-stanov-holodnoj-prokatki/>;
7. Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, А.В. Лагутин, О.Г. Иванова, В.М. Тютюнник Системы автоматического управления с запаздыванием.: Изд-во ТГТУ;
8. [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http://chemanalytica.com/book/novyy\\_spravochnik\\_khimika\\_i\\_tekhnologa/10\\_protsepy\\_i\\_apparaty\\_khimicheskikh\\_tekhnologiy\\_chast\\_II/7192](http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/10_protsepy_i_apparaty_khimicheskikh_tekhnologiy_chast_II/7192);
9. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т1: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред Н.Д. Егупова. - М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2000. – 736 с.;
10. Ордынцев В. М. Математическое описание объектов автоматизации. – М: Машиностроение. – 1965. – 360 с.;
11. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. М. Эйкхоффа. М. Мир, 1983. – 400 с.;
12. Юсупов П. М. Элементы теории идентификации технических объектов. – М.: Изд-во МО СССР, 1974. – 202 с.;

13. Дейч А.М Методы идентификации динамических объектов.- М.: Энергия, 1979.;
14. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1991. – 343 с.;
15. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд-во «Наука», 1966. – 768 с.;
16. Михайлов В.С. Теория управления. – К.: высш. шк. Головное изд-во, 1988. – 312 с.;
17. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. И доп. – К.: высш. шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.;
18. J.G. Ziegler, N.B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. – 1942;
19. O.J.M. Smith. Close Control of Loops with Dead Time // Chem. Eng. Prog. – 1957. – V.53 – P. 217-235;
20. Ордынцев В.М. Математическое описание объектов автоматизации. – М: Машиностроение, 1965. – 360 с.;
21. Современные методы идентификации систем/Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.;
22. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 686 с.;
23. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.;
24. A. Soukkou, M.C. Belhour, S. Leulmi. Review, Design, Optimization and Stability Analysis of Fractional-Order PID Controller // Int. J. Intel. Syst. Techn. Appl. – 2016. – №8(7). – P. 73-96;
25. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.;
26. В.В. Денисенко. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. – СТА. – 2007. - №4 - с. 86 – 97;

- 27.Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – с. 30-33.;
28. M. Kushawah, A. Patra. Tuning PID Controller for Speed Control of DC Motor Using Soft Computing Techniques-A Review. – 2014. – №4(2) – P. 141 – 148;
29. Kiam Heong Ang, Gregory Chong, Yun Li. PID Control System Analysis, Design, and Technology // IEEE Transactions on control systems technology. – 2005. – №13(4). – P.559 – 576;
- 30.S. Bennett. The past of PID controllers // Annual Reviews in Control. – 2001. – №25. – P. 43–53;
- 31.V. J. VanDoren. PID: Still the One // Control Engineering. – 2003. – P. 28-29;
- 32.S. Bennett. The past of PID controllers // Proceedings of IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control. – 2000. – P.1-11;
- 33.V. Kumar, B.C. Nakra Nakra, A. Mittal. A Review on Classical and Fuzzy PID Controllers // International Journal of Intelligent Control and Systems;
- 34.I. Kaya, N. Tan and D. P. Atherton. A refinement procedure for PID controller, Electrical Engineering // Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik). – 2006. – №88(3). – P.215-221;
- 35.K.J. Åström, and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning // 2nd edition, ISA, 1995.;
36. J.G. Ziegler, N.B. Nichols. Process lags in automatic control circuits // Transaction of the American. Society of Mechanical Engineers (ASME). – 1943. – №65. – P.433-444;
37. Sh. Bhagwan, A. Kumar, J.S. Soni. A Review on: PID Controller // International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering;
38. В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – №2(16). – С.47 – 61;
39. H. Om Bansal, R. Sharma, P. R. Shreeraman. PID Controller Tuning Techniques: A Review // J. Contr. Eng. Techn. (JCET). – 2012. – №2(4). – P. 168-176;

40. C. S. Soh, C. Bi and K. C. Chua. Direct PID Tuning For Spindle Motor Systems // Asia-Pacific Magnetic Recording Conference. – 2006. – P.1-2;
41. A. S. Jondhale, V. J. Gaikwad, S. R. Jondhale. Level Control of Tank System using PID Controller-A Review // International Journal for Scientific Research & Development. – 2015. – №3(10). – P.636-638;
42. Farhad Aslam, Mohd. Zeeshan Haider. An Implementation and Comparative Analysis of PID Controller and their Auto Tuning Method for Three Tank Liquid Level Control // Int. J. Comput. Appl. – 2011. – №21(8). – P.42-45;
43. G. H. Cohen, and G. A. Coon. Theoretical considerations of retarded control // Transactions of ASME. – 1953. – №75. – P. 827- 834;
44. Цавнин А. В. Исследование способов настройки ПИД-регулятора для объектов с транспортным запаздыванием на примере системы автоматического регулирования уровня / А. В. Цавнин, В. В. Курганов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г. : в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — С. 205-206;
45. K. K. Tan, T. H. Lee, R. Ferdous. New Approach for Design and Automatic Tuning of the Smith Predictor Controller // Ind. Eng. Chem. Res. – 1999. – №38. – P.3438-3445;
46. T. H. Lee, Q. G. Wang. Robust Smith-Predictor Controller for Uncertain Delay Systems // AIChE J. – 1996. – №42(4). – P.1033 – 1040.
47. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова.—2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.
48. Основы эргономики и безопасность труда: учеб. Пособие [Электронный ресурс] / Н.И. Чепелев, С.Н. Орловский, А.Ю. Щекин. – Красноярск, 2018. – 253 с.

49. Расчет искусственного освещения. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://window.edu.ru/resource/149/75149/files/raschet\\_isk\\_osv.pdf](http://window.edu.ru/resource/149/75149/files/raschet_isk_osv.pdf)
50. Назаренко О.Б. Безопасность жизнедеятельности: учеб пособие. – 3-е изд. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.
51. Определение допустимой зрительной нагрузки. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: <http://www.medoptika.ru/menu-articles-vis/187-article-about-vis-5.htm> (дата обращения - 20.03.2020);
52. Процесс утилизации оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: <http://33.utilizaciya.com/component/content/article/37-2010-06-25-11-04-04/62-2010-07-04-13-11-51/> (дата обращения - 20.03.2020);
53. Утилизация оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: <http://28.utilizaciya.com/component/content/article/37-2010-07-04-09-27-46/51-2010-07-04-09-30-57/> (дата обращения - 20.03.2020);
54. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/1200139176> (дата обращения - 20.03.2020);
55. Мероприятия по предупреждению ЧС и повышению уровня защиты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: [https://www.msu.ru/info/struct/gochs-mgu/docs/zashita\\_i\\_deistviya\\_v\\_chs.pdf](https://www.msu.ru/info/struct/gochs-mgu/docs/zashita_i_deistviya_v_chs.pdf) (дата обращения - 20.03.2020);
56. Основные мероприятия по предупреждению и ликвидации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный. Ссылка на ресурс: <http://biofile.ru/bio/10661.html> (дата обращения - 20.03.2020);
57. Безопасность жизнедеятельности: практикум / Ю.В. Бородин, М.В. Василевский, А.Г. Дашковский, О.Б. Назаренко, Ю.Ф. Свиридов, Н.А. Чулков, Ю.М. Федорчук. — Томск: Издво Томского политехнического университета, 2009. — 101 с

## Приложение А

### Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Исполни тели		Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длитель ность работ в календар ных днях $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожг}$ , чел-дни							
	Рук-ль	студент	Рук-ль	студент	Рук-ль	студент	Рук-ль	студент	Рук-ль	студент	Рук-ль	студент
Составление технического задания	2	-	2	-	2,8	-	+	-	2,8	-	4	-
Выбор направления исследований	3	-	3	-	3,4	-	+	-	3,4	-	5	-
Составление литературног о обзора	-	45	-	60	-	51	-	+	-	25,5	-	37,7
Построение модели эксперимента	-	3	-	5	-	3,8	-	+	-	1,9	-	2,8
Проведение практической части	-	5		9		6,6	-	+		6,6		9,7
Анализ и обработка результатов	1	1	2	2	1,4	1,4	+	+	0,7	0,7	1	1
Обсуждение и оценка эффективност и результатов	1	1	2	2	1,4	1,4	+	+	0,7	0,7	1	1
Составление пояснительно й записки	-	2	-	3	-	2,4	-	+	-	2,4	-	3
Подготовка к защите ВКР	-	10	-	14	-	12	-	+	-	6	-	9



## Приложение Б

### Development of algorithms and selection of regulators for control of product pipeline with high transport delay

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ81	Хасанов Михаил Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения автоматизации и робототехники	Курганов Василий Васильевич	к.т.н., доцент		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Горбатова Татьяна Николаевна			

## **Introduction**

Today it is very difficult to imagine industrial production without the means of automatic systems, as this greatly simplifies and increases the efficiency of various process control. From this we can conclude that the creation of automated systems is a very actual and difficult task.

Nowadays systems with delay attract a huge attention. The relevance is determined by a number of reasons, for example, a number of technological processes are delayed. The delay resulting from the movement of a product of long conveyor lines or pipelines is called transport delay, for example, the movement of a substance at a certain speed in the system, without any changes in its properties. In addition, the delay can be in control systems, where devices do not operate continuously. The calculation of such systems has many features and specifics. These systems of automatic control of objects with delay are dynamic. There are also objects with hidden delays that have little effect on their performance; very often they are neglected.

In production, research, design and calculation, there are often situations when transport deadtime in an object cannot be neglected. It is necessary to take into account the deadtime when control is carried out by computers, information is transmitted and large-scale control computations are done in real time. Moreover, in the many cases, deadtime results in difficulties arising with stability and quality of management. Nevertheless, the reverse is also possible since lag can be positive in the system.

**The aim** of this work is to develop algorithms and select regulators for managing the product pipeline with a large transport delay.

### **1. Literature review**

#### **1.1 Objects with transport delay**

Not a small share in industry is occupied by objects with transport delays. There are many examples. This is mainly production, where the components of the technological process are at a distance from each other sufficient so that a deadtime link appears in the technological process.

As examples of a process with delay are: 1) the process of transporting bulk materials; 2) Production of cement clinker; 3) Transportation of petroleum products.

## **1.2 Identification of automatic control systems**

Identification of systems is the methods series for the formation of mathematical models according to the obtained data as a result of observations. A model is a mathematical description of a system process. The construction of a mathematical model can be carried out both by analytical and experimental methods [9-12, 20].

The analytical method is based on dividing the system into smaller subsystems. Their properties, as a rule, are known from experience gained by observing an object [21].

Upon receiving the complete information about the object, it is accordingly possible to obtain sufficient and reliable results. In the absence of sufficient data about the object, the description by mathematical models becomes impossible. In this case, resort to experimental methods, where information is processed by experimental methods.

## **1.3 Graphical identification method using transient response**

In the vast majority of cases, to determine the transfer function of the system, it is necessary to use the transition characteristic obtained by the analytical or experimental method. This graphical identification method using a transient response is suitable for most types of systems. But the most correct will be to use this identification method precisely in first-order processes.

## **1.4 Proportional integral-differentiating controllers**

Today, a wide range of mathematical methods are used in the field of designing control systems. What is more, many problems of control, modeling and optimization can be transformed into learning problems and solved with the help of appropriate mathematical tools. PID controllers, as a rule, don't work well enough for a nonlinear complex of systems that do not have exact mathematical models [23]. However, it is very common in industry, as it is the most versatile.

### **1.5 Description and calculation of PID controllers**

Today, PID controllers are becoming the most frequently used in technical systems (they are used in 95% of control circuits). It is due to the fact that these regulators allow to achieve the set management goals for most technological objects, moreover, they have a compact and simple structure. Recently, innovations have also been added that make it possible to implement differentiation, the struggle with the saturation of the integral component [24-26].

In this regulator, the proportional term - provides a general control action proportional to the error signal on the entire pass gain; integral - reduces stationary errors due to low-frequency compensation by the integrator; differentiating - improves the transient response due to high-frequency compensation by the differentiator [27].

Compared to a two-character PI controller, a full PID controller can anticipate the level of operation that is ultimately required to maintain a process variable at a new set value. However, sharp fluctuations in control work can be problematic in applications that require slow and steady changes at the controller output [28-30].

The block diagram of the classical PID control system is shown in figure 1.

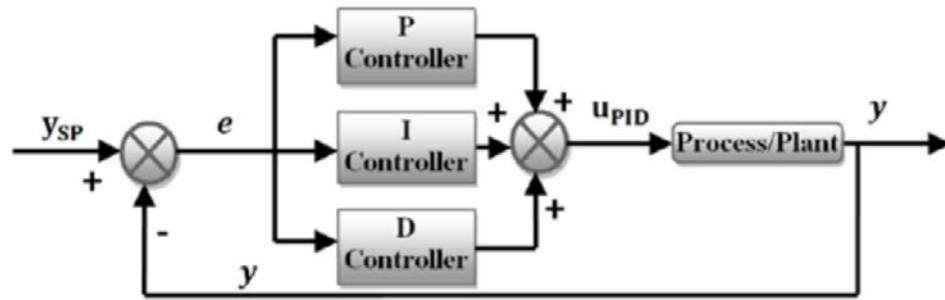


Figure 1 – Classic PID Controller [31]

The output signal of the classic PID controller with continuous time, as shown in the figure 1, is defined as [31]:

$$u_{PID}(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de}{dt}$$

Where  $e(t)$  is the error,  $K_c$  is the proportionality coefficient (constant),  $\tau_I$  is the integral time constant,  $\tau_D$  is the differential time constant, PID is the output of the classical PID controller.

The differentiating action also tends to add a sharp burst or “blow” to the controller output in the case of a sharp change in error due to a new setting [32, 33].

This forces the controller to immediately begin the corrective action, without waiting for the integral or proportional action to take effect.

With an additional differentiating effect, such problems as, for example, overshoot are reduced. However, the problems of finding the right PID controller parameter have not been resolved yet.

Engineers Taylor Ziegler and Nichols solved this problem by developing the well-known Ziegler-Nichols (Ziegler-Nichols) tuning method, which is still widely used [34].

The calculation of the proportional integro-differentiating (PID) is performed based on the requirements of the quality of regulation and restrictions on the values of variables in the system. In order to make the most qualitative description of a system with a PID controller, many additional quality indicators are required.

### 1.5.1 Ziegler-Nichols Method

The Ziegler-Nichols method appeared in 1942, and was officially published as a method for calculating PID controllers. It is empirical and uses experimental data [35]. This is by far the most popular tuning method to use and is still a simple, fairly effective method of tuning PID controllers [36].

There are two methods proposed by Ziegler and Nichols. The proposed Ziegler-Nichols tuning is shown in Table 1. This method was used to tune PID controllers for spindle motor systems [37].

Table 1 - Typical parameters of regulators

	$k_n$	$k_n$	$k_d$
<b>П-регулятор</b>	$0,50k_n^*$		
<b>ПИ-регулятор</b>	$0,45k_n^*$	$0,54k_n^*/T^*$	
<b>ПИД-регулятор</b>	$0,60k_n^*$	$1,2k_n^*/T^*$	$0,075k_n^*T^*$

In the second version of this method, the key element is the reaction of the object to a change in the control action. This characteristic is called the acceleration curve. Objects having an aperiodic acceleration curve, as in figure 2, consist of aperiodic and lagging system links connected in series.

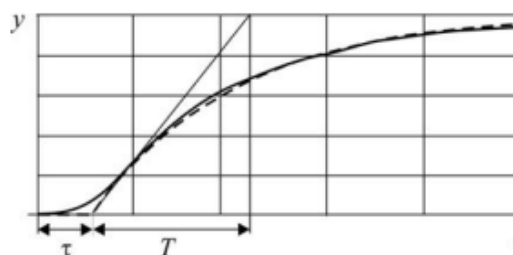


Figure2 – Step effect during the reaction of the object

Here the transfer function has the form:

$$W_o(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

where **k** is the transmission coefficient, **T** is the time constant, and **τ** is the delay time.

The Ziegler and Nichols method is the first PID controller tuning method, which is based on certain controller assumptions. Therefore, there is always a need for further customization; because the received controller settings are quite “aggressive” and, thus, lead to excessive overshoot and vibrational response. Also, for the first method, in a noisy environment the parameters are rather difficult to evaluate. In the second method, since the system moves to instability in determining the parameters, in practice this can be very harmful for the system.

Regulators calculated using the Ziegler-Nichols method are not always able to provide a high-quality regulatory process. Despite this, the Ziegler – Nichols method has its own popularity, which is why a number of manufacturers recommend them for tuning regulators [18].

### 1.5.2 Cohen-Coon Method

In this method, the response of the system is modeled on a step change in the form of a first-order response plus delay time using the Cohen-Kuhn method. From this answer parameters K, τ are found. K is the output steady state divided by the change in the input step, τ is the effective first-order response time constant, and this is dead time.

The Cohen-Kuhn method used an approximate equation mode:

$$G_{PRC(s)} = \frac{\overline{y_m(s)}}{\overline{c(s)}} \approx \frac{K e^{-tds}}{\tau s + 1}$$

and estimated the values of the parameters  $K$ ,  $\tau$  and as described above. Then they derived expressions for the best controller settings, using a one-quarter attenuation coefficient. From  $K$ ,  $\tau$  PID parameters are calculated using the following formulas:

$$K_c = (1/K) (\tau/t_d) (4/3 + t_d/(4\tau))$$

$$\tau_I = t_d (32 + 6 t_d/\tau) / (13 + 8 t_d/\tau)$$

$$\tau_D = 4 t_d / (11 + 2 t_d/\tau)$$

Cohen and Kuhn [38] were engaged in the development of a method with PID controller parameters determined on the basis of the FOLPD model. The main design requirement is the rejection of load disturbances. Despite the best model, the results of the Cohen-Kuhn method are not much better than those of the Ziegler-Nichols method [36].

## 1.6 Smith Controller for Delay Systems

Time delays are common in many manufacturing processes, and they cause complications in the management-related problems associated with these processes. PID regulators are often ineffective for controlling such processes, since a significant amount of detuning is required to maintain closed loop stability. Smith (1957) introduced a delay compensator, which today is more commonly known as the Smith predictor controller.

The controller includes a process model that allows to predict process variables, and the controller can be designed as if the process was free from delays. Smith's predictive controller offers potential improvements in closed loop performance over conventional controllers (Marshall, 1979) and has been extended to delayed multi-parameter systems (Alevsakakis and Seborg, 1974; Palmor and Halevi, 1983). Palmor and Powers (1985) and Huang et al. (1990). However, like other model-based control systems, the Smith predictor controller requires a very accurate process model. If there



is a mismatch between the model and the actual process, closed-loop performance can be very low. In fact, it has been shown that Smith systems can become unstable even with infinitely small perturbations in the “universal accounts” for choosing the closed loop bandwidth, given the uncertainty associated with the process downtime. However, all these studies did not take into account the influence of simultaneous uncertainties in the gain, time constant, and downtime on the reliability of Smith predictor controllers [39, 40].

Smith's regulator is capable to predict the output signal. To do this, he can use the model of the object, which consists of  $M_0$  and delay  $e^{-sL}$  (fig.3). Due to this, it is possible to eliminate the delay, and it is possible to understand the behavior of the object before the output signal appears. The current fact suggests that the implementation is possible by the system shown in Figure 10, where  $R$  is the PID controller,  $P_o e^{-sL}$  - the object characteristic.

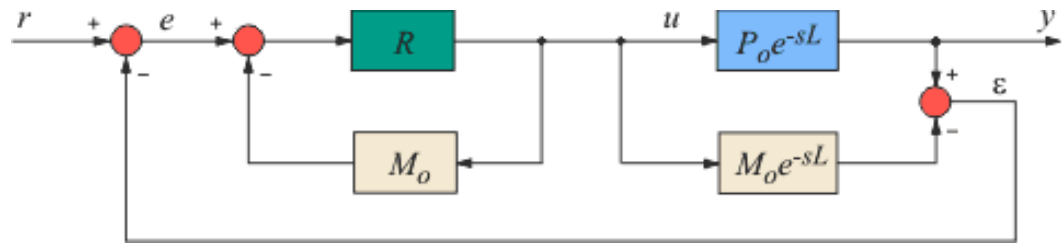


Figure 3 - Smith predictor system

Based on the assumption that the model is accurate, the difference between the signals at the outputs of the model and the object is zero,  $\varepsilon = 0$ , then from Figure 10 we get:

$$y = P_o e^{-sL} \left( \frac{R}{1 + R M_o} \right) r = \left( \frac{P_o R}{1 + P_o R} e^{-sL} \right) r$$

Here  $\frac{P_o R}{1 + P_o R}$  is a function without transport delay. This suggests that the link with the delay is absent in the OS loop and does not affect the stability and performance of the system, due to the fact that there is regulation in the loop without delay.

We now consider the work of the predictor without a variant in which the difference is not equal to zero, this can be described by the following system of equations:

$$y = P_o e^{-sL} R(r - \varepsilon - M_o u), \quad \varepsilon = y - M_o e^{-sL} u, \quad y = P_o e^{-sL} u$$

It follows:

$$y = \left[ \frac{P_o R}{1 + R M_o + R(P_o - M_o)e^{-sL}} r \right] e^{-sL}$$

Obviously, with increasing accuracy, the difference in the denominator tends to zero and the transport delay is excluded from the transfer function of the system, which only adds to the result [19].

## 2. Object and research methods

### 2.1 Research object description

The object shown in Figure 4 is used in this work. It consists of two containers: 1 – is the main capacity, 2 - is the auxiliary capacity. A liquid level sensor based on the measurement of the liquid column is built into the main tank.

Special arrangement of containers allows to drain freely, where the main tank is located above the auxiliary.

Through the pipeline by using the pump (8), the liquid is poured into the main and auxiliary tanks, where the pipeline is a delay unit. Moreover, in this case the delay can't reach more than 40 seconds, otherwise it will be higher than the pump performance.

The analog output signal is formed as a result of the receipt of the measurement results in the controller, where the signal enters the frequency converter, which controls the pump performance. For this object, the value that the regulator sets and the opening value of the manual valve will be disturbing influences.

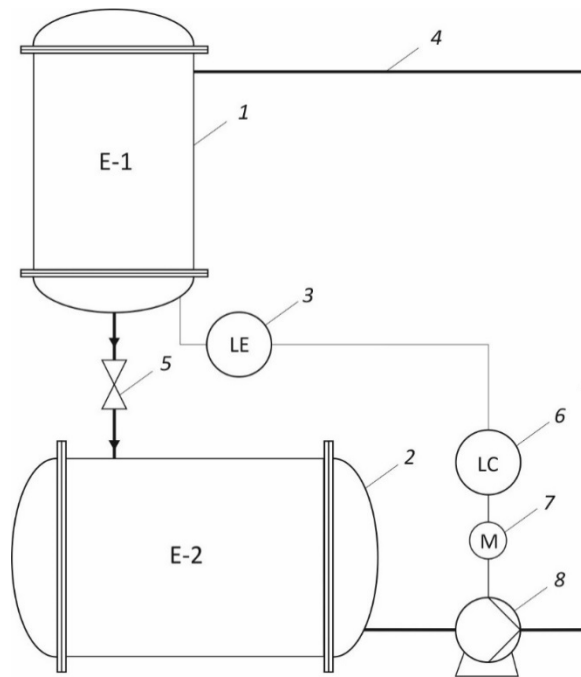


Figure 4 - scheme of the control object (1 - main tank; 2 - auxiliary tank; 3 - level sensor; 4 - delay line; 5 - manual valve; 6 - control level; 7 - pump drive; 8 - pump)

## 2.2 Experimental equipment

In this system, as in many other small automated control systems, the OWEN PLC 150 - 220 controller is used. The power supply circuit, discrete and analog inputs and outputs of the PLC 150 - 220 are shown in Figure 5.

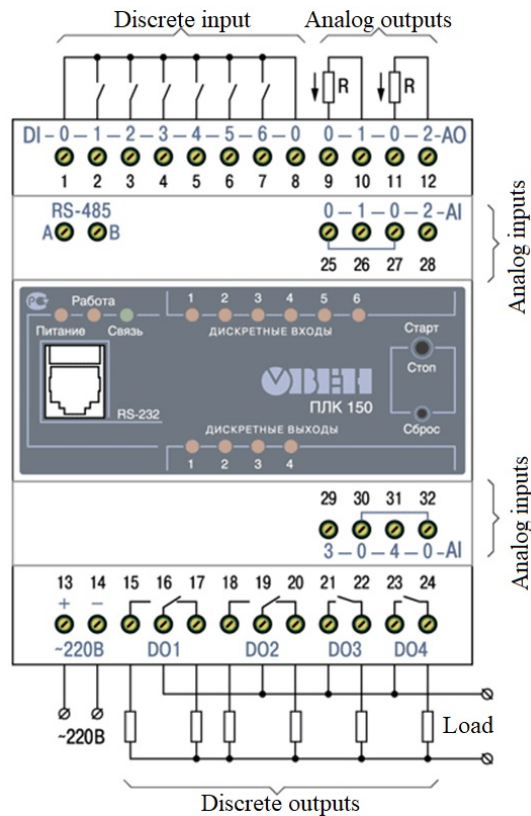


Figure 5 - Scheme of inputs and outputs, and power connectors

The parameters list and controller characteristics are presented below. RISC ARM9 processor (180 MHz); RAM (random access memory) 8MB; ROM (read only memory) 4MB; SRAM (static random access memory) 16KB; Lack of an operating system; discrete input speed 10KHz; the presence of analog inputs and outputs; the presence of Ethernet interfaces (as well as RS-232, RS-485, using radio, GSM, ADSL modems); operating temperature from -20 to +70 °C; self-diagnosis capabilities; real time clock; built-in battery; the ability to save archives to external media; a set of ready-made software modules provided for free; expansion of input/output points.

### 2.3 Modeling a control system in a “Matlab” environment

MATLAB environment is used for simulating an automatic system. Moreover, MATLAB is the environment for calculating and visualizing results as well as for programming. Owing to this environment, it is possible to undergo the data to deep analysis, as well as to develop models and algorithms. Many built-in functions and

environments allow to explore different solutions. For example, the Simulink environment is a special block diagram tool for model-oriented design of dynamic and embedded systems; it is a graphical programming language (fig. 6).

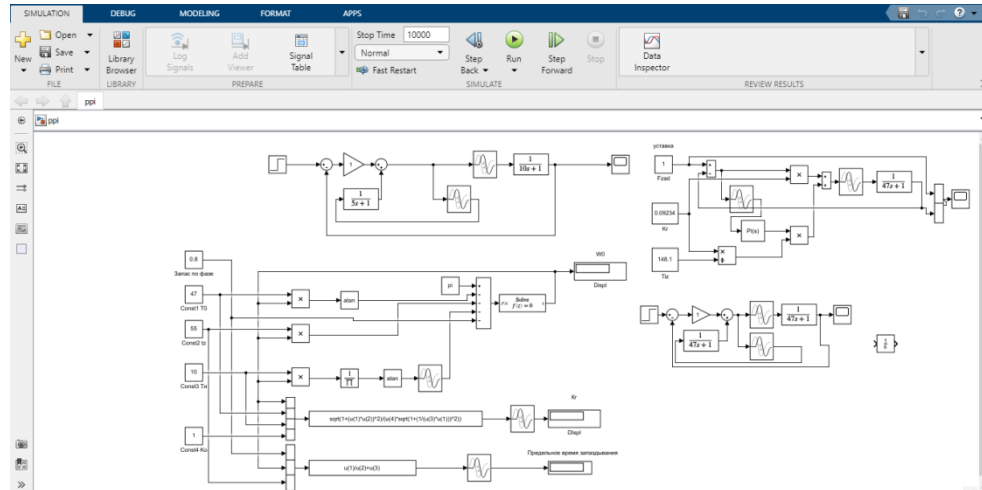


Figure 6 - Window of the Simulink graphical programming environment

The work covers simulation of the Smith controller and the PID controller in this environment.

## 2.4 Creating a control program for the controller in the “Codesys” environment

CoDeSys (Controller Development System) is specialized software for industrial automation developed by 3S-Smart Software Solutions GmbH in Germany. This software is based on a software development environment for programmable logic controllers. In CoDeSys, programming languages are IEC 61131-3. Today, CoDeSys is used in many industries. More than 300 companies in the world manufacture controllers with CoDeSys software as a standard programming tool.

The Codesys software window is shown on the figure 7.

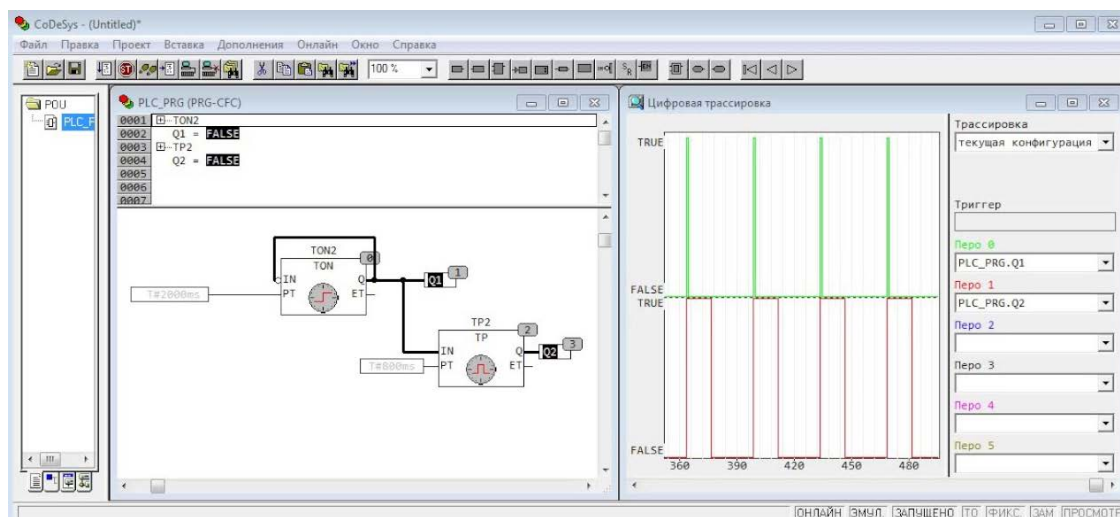


Figure 7 - Codesys controller programming environment window

## 2.5 The characteristics of the control object determination

The graph of acceleration is the influence of the control object on the step effect at the input or the transition characteristic  $h(t)$ . On the basis of this we can state that dynamic characteristics are determined in accordance to the acceleration curve.

The amount of water in the tank grows linearly, when exposed at the inlet, which is of a constant nature.

In the ideal case, in the presence of a dimensionless capacity and an unlimited amount of liquid, the object can be represented as an ideal integrating unit. To determine the graph of the acceleration curve, water is poured into the auxiliary tank from the main tank to a minimum. After that, the regulator is switched to manual mode, where it is necessary to fix the time of input of the step input (step effect is a change in the control signal to the frequency converter), which increases or decreases the pump performance. Figure 8 shows the system acceleration curve.

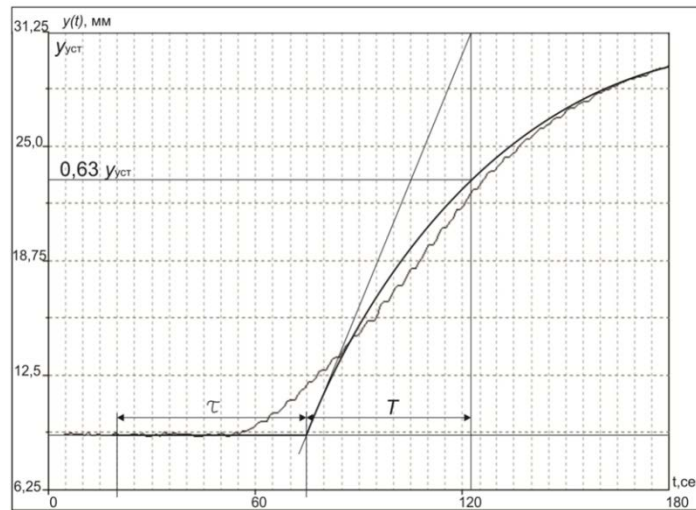


Figure 8 – Acceleration characteristic with step input

$W(s) = \frac{k}{Ts+1} \cdot e^{-\tau \cdot s}$  - transfer function of the control object, where  $\tau$  is the delay time (time interval from the moment of input signal to the moment of the system changes);  $T$  is the time constant of the object;  $k$  is the transmission coefficient (the ratio of the steady-state value of the output quantity to the value of the stepwise input signal,  $k = 1.2$ ).

The output value of the object under study is the level that changes during the experiment, where its change corresponds to a change in the control signal to the actuating mechanism.

The delay time  $\tau = 55$  s is determined from the acceleration curve. The time constant is determined from the acceleration curve  $T = 47$  seconds.

Таким образом, исходя из вышеперечисленного, можем записать выражение для функции кривой разгона:

Based on mentioned above, it is possible to write the formula for the acceleration curve function:

$$W(s) = \frac{1,3}{47s + 1} \cdot e^{-55s}.$$

Obviously, difficulties are possible with traditional methods of tuning the regulator, since the ratio  $\tau / T > 1$ .

This ratio is a guide for the design engineer when choosing a regulator so that it is as reliable as possible. If  $0.2 < \tau / T < 1$ , it will be better and more reliable to take

a PID or PI controller (continuous or digital), if  $\tau / T < 0.2$  it is better to take a digital or continuous controller, and if this ratio is more than one, there is a need to compensate for the delay in the control system loop, for which there is a regulator with a predictor performing the compensation. It's worth noting that this regulator can also be used at lower ratios.



#### 4. Conclusion

After studying theoretical calculations and based on the analysis of theoretical information about systems with transport lag, it can be argued that lag affects the stability of the system and, as a result, the quality of regulation.

As a result of the implementation of the VKR, both theoretical and practical work was carried out. The results obtained during experimental studies fully confirmed the theoretical conclusions about the effect of lag on the stability of closed systems.

During the work, a comparative analysis of the control algorithms was carried out: classic PID regulator; Smith's predictor.

It was noted that in the first and second cases the results are far from ideal. But if with the PID regulator the resource is almost exhausted, then in the case of the Smith predictor there is a large field for improving the model, which is one of the main sources of mediocre regulation.

But even from the results obtained, one can draw an unambiguous conclusion in favor of the Smith predictor, which allows us to exclude the effect of lag on the stability of the control object with appropriate tuning of the object model.